

INVESTIGACIÓN Y ELABORACIÓN DE MANUAL DEL PROCESO DE SHOT  
PEENING PARA CONEXIONES ROTARIAS DE HOMBRO FABRICADAS Y  
REPARADAS EN PEMARSA S.A.

JOHAN MANUEL MEDINA TOVAR



**LOS LIBERTADORES**  
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA MECÁNICA

BOGOTÁ D.C.

2017

INVESTIGACIÓN Y ELABORACIÓN DE MANUAL DEL PROCESO DE SHOT  
PEENING PARA CONEXIONES ROTARIAS DE HOMBRO FABRICADAS Y  
REPARADAS EN PEMARSA S.A.

JOHAN MANUEL MEDINA TOVAR

Proyecto para optar al grado de  
INGENIERO MECÁNICO

Director(a):

ING. MsC. FREDY ALEJANDRO ORJUELA GUERRERO

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA MECÁNICA

BOGOTÁ D.C.

2017

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

---

Firma de Jurado

---

Firma de Jurado

---

DIRECTOR DE PROYECTO DE GRADO  
ING. MsC. Fredy Alejandro Orjuela Guerrero

## AGRADECIMIENTOS

Primeramente a Dios por darme la fuerza y la vida para ejecutar todas las etapas propuestas.

A mi madre, padre y hermano los cuales me apoyaron todos los momentos importantes de mi vida.

A mi novia Angy la cual me fortaleció cada día y me apoyo en todas las adversidades del camino.

Al Ing. David Rogelio Cortés de Pemarsa S.A. El cual me dio la idea principal para la comenzar el proyecto.

A mis compañeros de trabajo como el Ing. Giovanni Gómez, Jhon Ardila, Duvan Lozano, Edgar Calvo los cuales me ayudaron con los diferentes procesos especiales requeridos en las pruebas realizadas.

Al Ing. Pedro Martínez y en general a Pemarsa Oilfield Services S.A. por su apoyo económico y apoyo en la utilización de máquinas e instrumentos necesarios para la ejecución del proyecto.

Al Ing. Fredy Alejandro Orjuela por su gran aporte como tutor de este proyecto y poder encaminarlo a su culminación de forma satisfactoria.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN .....	11
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	13
2. JUSTIFICACIÓN.....	14
3. OBJETIVOS.....	16
3.1. GENERALES .....	16
3.2. ESPECÍFICOS .....	16
4. MARCO TEÓRICO .....	17
4.1. EL SHOT PEENING.....	17
4.2. INFLUENCIA DEL SHOT PEENING EN LOS ESFUERZOS RESIDUALES DE LOS MATERIALES .....	19
4.2.1. Perfil de esfuerzo residual .....	21
4.2.2. Magnitud de esfuerzos residuales .....	23
4.2.3. Medición de los esfuerzos residuales .....	25
4.3. CONTROL DEL PROCESO DE SHOT PEENING .....	29
4.3.1. Intensidad Almen .....	29
4.3.1.1. Tira de prueba (test strip) .....	30
4.3.1.2. Accesorio de sujeción .....	32
4.3.1.3. Almen gauge .....	33
4.3.1.4. Designación estándar para la medición de la intensidad..	34
4.3.1.5. Saturación .....	36
4.3.1.6. Procedimiento basado en la relación de la altura del arco vs tiempo de exposición. ....	37
4.3.1.7. Configuración de proceso de medición de intensidad Almen para procesos de producción. ....	38
4.3.1.8. Proceso de control de la intensidad .....	39
4.3.1.9. Recomendaciones .....	39
4.3.2. Cobertura .....	40
4.3.2.1. Determinación de la cobertura .....	41
4.3.2.2. Causa y efecto en la cobertura .....	45
4.3.2.2.1. Relación entre Ar y C% .....	46
4.3.3. Granalla para Shot Peening.....	48
4.3.3.1. Efectos de la dureza de las esferas en el Shot Peening...	49
4.3.3.2. Control de las esferas de Shot Peening.....	50
4.3.4. Máquinas y equipos para realización de Shot Peening.....	54
4.3.4.1. Maquinas convencionales .....	54

4.3.4.2.	Sistemas de recuperación y clasificación de las partículas	55
4.3.4.2.1.	Maquina neumática	57
4.3.4.2.1.1.	Principio de operación	57
4.3.4.3.	Boquillas	58
4.4.	MATERIALES DE SUBSTITUTOS UTILIZADOS EN LOS MOTORES DE PERFORACIÓN PETROLERA.	59
4.4.1.	Clasificación de materiales según norma API 7-1	59
4.4.1.1.	Aceros al carbón	59
4.4.1.2.	Acero inoxidable	61
4.5.	CONEXIONES ROTARIAS DE HOMBRO	62
5.	CONDICIONES ESTABLECIDAS DE SHOT PEENING	64
5.1.	SELECCIÓN DE CONEXIÓN API 7-2	64
5.2.	PARÁMETROS DEL PROCESO DE SHOT PEENING	65
5.3.	MAQUINAS Y EQUIPOS	66
6.	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	68
6.1.	CURVA DE SATURACIÓN	68
6.1.1.	Shot Peening sobre tiras de prueba Almen	69
6.1.2.	Medición de altura de arco en tiras de prueba Almen	70
6.1.3.	Elaboración de curva de saturación	72
6.2.	PRUEBA PILOTO DE SHOT PEENING	73
6.2.1.	Parámetros establecidos	73
6.2.2.	Altura de curvatura en tiras de prueba Almen	73
6.2.3.	Solucionador de curva de saturación	74
6.2.4.	Curva de saturación	74
6.3.	NUMERO DE REPLICAS	75
6.4.	PRUEBA DE SHOT PEENING	76
6.5.	PRUEBA DE INTENSIDAD ALMEN EN PROCESO PRODUCTIVO	77
6.6.	COBERTURA COMPLETA EN PROCESO DE SHOT PEENING	79
6.7.	AUMENTO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA	80
7.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	82
7.1.	PRUEBA DE SHOT PEENING	82
7.1.1.	Parámetros establecidos	82
7.1.2.	Altura de curvatura en tiras de prueba Almen	83
7.1.3.	Solucionador de curva de saturación	83
7.1.4.	Curva de saturación	84
7.2.	PRUEBA DE FALLA A FATIGA	85
8.	CONCLUSIONES	87
	BIBLIOGRAFÍA	88

ANEXO A: INSTRUCTIVO SHOT PEENING PARA CONEXIONES ROTARIAS DE HOMBRO .....	93
ANEXO B: INSTRUCTIVO MEDICIÓN Y VERIFICACIÓN DE INTENSIDAD ALMEN EN EL SHOT PEENING .....	96
ANEXO C: INSTRUCTIVO VERIFICACIÓN Y CONTROL CALIDAD DE COBERTURA EN SHOT PEENING. ....	99

## LISTA DE FIGURA

	Pág.
Figura 1. Impacto y huella superficial en el proceso de Shot Peening.....	17
Figura 2. Relación entre la zona de esfuerzo residual y la zona indentada por Shot Peening ...	18
Figura 3. Efecto compresivo sobre las partículas internamente. ....	18
Figura 4. Efecto de cierre de grieta del Shot Peening sobre una superficie. ....	19
Figura 5. Representación del perfil de tensiones residuales tras un tratamiento de Shot Peening. ....	20
Figura 6. Perfil de esfuerzos resultantes. ....	21
Figura 7. Perfil de esfuerzos resultantes con cargas a flexión en muesca. ....	22
Figura 8. Perfil de esfuerzos resultantes tras proceso de Shot Peening sobre una muesca sometida flexión. ....	23
Figura 9. Relación entre la profundidad de la capa compresiva y la intensidad del Shot Peening para tres aceros con diferentes durezas. ....	24
Figura 10. Curva S-N para una probeta de acero Ck-45 templada y revenida (600°C cada 2h) bajo cargas alternantes antes y después de aplicación de Shot Peening .....	27
Figura 11. Esfuerzos residuales introducidos por el Shot Peening para un acero AISI/SAE 4340 tratado térmicamente con un valor de $S_{ut}=1800$ MPa .....	28
Figura 12. Especificaciones dimensionales de Tiras de prueba Almen (unidades en mm). ....	30
Figura 13. Especificaciones dimensionales de accesorio de sujeción para test Almen (unidades en in) .....	32
Figura 14. Especificaciones dimensionales para Almen Gauge (unidades en mm) .....	33
Figura 15. Designación estándar de la medición de la intensidad Almen (unidades en mm). ...	34
Figura 16. Designación alternativa para la medición de la intensidad Almen (unidades en in) ..	34
Figura 17. Curva de saturación del Shot Peening. ....	36
Figura 18. Configuración de accesorio de sujeción con tira de prueba Almen en pieza a tratar con proceso de Shot Peening. ....	38
Figura 19. Cobertura parcial vs cobertura total en el proceso de Shot Peening. ....	41
Figura 20. Método de inspección de cobertura por trazas fluorescentes. ....	43
Figura 21. Replica de referencia para porcentajes de cobertura normalizados de Shot Peening. ....	44
Figura 22. Fotografía de una cobertura de 63% en un área bajo Shot Peening. ....	45
Figura 23. Gráfico de ecuación 2 relación entre C% y Ar. ....	46
Figura 24. Efecto de la dureza de las esferas en el proceso de Shot Peening. ....	49
Figura 25. Tipos de huellas aceptables y no aceptables en el proceso de Shot Peening. ....	50
Figura 26. Fotografía ampliada 100x de la superficie tratada con esferas de buena y mala calidad en el proceso de Shot Peening. ....	51



Figura 27. Calidad de esferas para proceso de Shot Peening. ....	51
Figura 28. Esquema general del sistema de recuperación y separación de partículas. ....	55
Figura 29. Equipo para clasificación de partículas. ....	56
Figura 30. Sistema de funcionamiento de máquinas neumáticas de sifón (izquierda) y por gravedad (derecha). ....	57
Figura 31. Parámetros de boquilla efectuados en el proceso de Shot Peening con maquina neumática. ....	58
Figura 32. Tipo de boquillas para Shot Peening. De agujero recto (izquierda) y tipo Venturi (derecha). ....	59
Figura 33. Unión entre conexión PIN (izquierda) y conexión BOX (derecha) para herramientas de perforación petrolera.....	62
Figura 34. Dibujo de conexión rotaria de hombro (PIN). ....	64
Figura 35. Compresor PUMA. ....	66
Figura 36. Cabina de granallado ECONOLINE. ....	67
Figura 37. Sistema de rodillos giratorios. ....	67
Figura 38. Peenscan Pens, accesorio y tiras de prueba Almen .....	68
Figura 39. Fresadora NC y comparador de caratulas utilizados para medición de intensidad Almen. ....	68
Figura 40. Realización de Shot Peening sobre tiras de prueba Almen. ....	69
Figura 41. Medición de altura en tiras de prueba Almen. ....	71
Figura 42. Solucionador para curva de saturación. ....	72
Figura 43. Curva de saturación de primer prueba de Shot Peening. ....	75
Figura 44. Prueba de intensidad Almen en NC50 API PIN. ....	78
Figura 45. Control calidad de cobertura en la conexión NC50 API PIN, antes (izquierda) y después (derecha) de proceso de Shot Peening. ....	80
Figura 46. Dimensiones geométricas de probeta para fallo a fatiga .....	80
Figura 47. HSM 19 Maquina de fatiga rotativa. ....	81
Figura 48. Curva de saturación de prueba de Shot Peening.....	84
Figura 49. Grafico comparativo de ciclos de falla a fatiga del proceso de Shot Peening. ....	86

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características principales de los diferentes métodos de medición de esfuerzos residuales. ....	26
Tabla 2. Ciclos de falla para probetas de aluminio 2024-T3 con y sin proceso de Shot Peening .....	28
Tabla 3. Escala de intensidades de Shot Peening. ....	35
Tabla 4. Cobertura C% para valores de Ar entero. ....	47
Tabla 5. Equivalencia de tamaño de esferas según normatividad SAE. ....	52
Tabla 6. Codificación para cada tipo de esferas según norma AMS. ....	53
Tabla 7. Partes de las maquinas convencionales de Shot Peening.....	55
Tabla 8. Propiedades mecánicas y de prueba para materiales de Drill Collar estándar. ....	60
Tabla 9. Propiedades mecánicas y de prueba para Drill Collar en material no magnético. ....	61
Tabla 103. Dimensiones de la conexión NC 50 PIN (mm). ....	64
Tabla 11. Parámetros de prueba piloto de Shot Peening.....	73
Tabla 12. Altura de curvatura en tiras de prueba Almen para prueba piloto de Shot Peening ...	73
Tabla 13. Resultados de solucionador de curva de saturación SCS3 de prueba piloto de Shot Peening. ....	74
Tabla 14. Numero de réplicas para prueba de Shot Peening .....	76
Tabla 15. Parámetros de prueba de Shot Peening. ....	82
Tabla 16. Altura de curvatura en tiras de prueba Almen para prueba de Shot Peening. ....	83
Tabla 17. Promedio de altura de arco para tiempos iguales. ....	83
Tabla 18. Resultados de solucionador de curva de saturación SCS3 para prueba de Shot Peening .....	84
Tabla 19. Numero de ciclos de falla a fatiga para probetas con y sin Shot Peening .....	85

## INTRODUCCIÓN

El petróleo se ha convertido en la principal fuente de energía con el pasar de los años, por lo cual su extracción requiere maquinaria y herramientas con un nivel de precisión muy alto para garantizar la calidad del servicio. Para el proceso de perforación en un pozo petrolero se utiliza principalmente la sarta de perforación la cual consta de un conjunto de elementos que se conectan en su mayoría por conexiones rotarias de hombro.

Existen procesos metalmecánicos con los cuales se fabrican las herramientas que componen las diferentes etapas de una sarta de perforación, entre ellos los procesos por arranque de viruta (torneado, fresado, rectificado, corte, bruñido, etc.). En estos procesos metalmecánicos se utilizan aceros a nivel de ingeniería como son: AISI 4140, AISI 4340, AISI 4145H, de los cuales se fabrican las herramientas tipo crossover las cuales según CAVO Drilling Motors permiten conectar el motor de perforación con la sarta de perforación (CAVO, 2005), estos crossovers están conectados por medio conexiones rotarias de hombro (API 7-2: Specification for Threading and Gauging of Rotary Shouldered Thread Connections) que se fabrican por procesos de arranque de viruta al igual que la misma herramienta, como resultado del mecanizado se generan tensiones superficiales en el acero, las cuales disminuyen la vida útil de las herramientas en las zonas mecanizadas. Para corregir este efecto existe un proceso de trabajo en frío llamado Shot Peening en el cual las herramientas mecanizadas son expuestas a un chorro de aire a presión que contiene pequeñas esferas que al hacer contacto con el material dejan una huella y eliminan estas tensiones superficiales y las convierten en esfuerzos de compresión, lo que significa que la herramienta va tener una vida útil más larga. (GRANALLADORA AMERICANA S.C.A.)

Pemarsa Oilfield Services S.A. es una empresa dedicada a la fabricación de herramientas para la industria petrolera, la cual está certificada ante American Petroleum Institute (API) con la norma API 7-1 Specification for Rotary Drill Stem Elements, esta norma permite que sean fabricados todos los tipos de

crossovers que componen la sarta de perforación bajo el monograma de API, y para complementar el servicio de fabricación de herramientas de perforación petrolera se realiza el proceso de Shot Peening en todas sus conexiones rotarias de hombro. Con el fin de mejorar el proceso, este trabajo de investigación busca realizar un procedimiento para estandarizar y documentar de una forma clara y organizada todos los parámetros fundamentales para la realización del Shot Peening de una forma más profesional y científica para así obtener mayores beneficios relacionados con la prolongación de la vida útil de todas las herramientas fabricadas en Pemarsa S.A., ya que actualmente no se está realizando el proceso de Shot Peening de una forma adecuada para conexiones rotarias de hombro, según el requerimiento de sus clientes.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las herramientas utilizadas en la perforación de pozos petroleros normalmente están sometidas a esfuerzos de torsión, tensión y compresión así que presentan mucho desgaste por efecto de la fatiga. Se han estudiado, durante muchos años, soluciones que permitan alargar la vida útil de las herramientas para una mayor efectividad de operación. Aplicando recubrimientos duros de tungsteno se logra proteger la parte externa que está en contacto con el pozo, pero las zonas del motor de perforación que no están en contacto directo con el pozo son seriamente afectadas por la fatiga, la corrosión y el desgaste. Las conexiones rotarias de hombro son los elementos que más se desgastan en una herramienta de perforación petrolera después de los elementos con recubrimientos duros de tungsteno, así que se reparan con mucha frecuencia y se invierte mucho dinero en ello. El Shot Peening es una técnica de trabajo en frío que por medio de impactos de pequeñas esferas sobre una superficie elimina las tensiones superficiales generadas por los procesos de mecanizado de los aceros y los materiales no ferrosos, así permite alargar la vida útil de una herramienta o de una sección de herramienta que haya sido sometida a este trabajo. (GRANALLADORA AMERICANA S.C.A.)

A partir de lo anterior se plantea el problema de investigación:

¿Cómo se puede mejorar los procedimientos dentro del proceso de Shot Peening para las conexiones rotarias de hombro y evidenciar un aumento en la vida útil de las herramientas de fabricación y de reparación que se realicen en Pemarsa S.A.?

## 2. JUSTIFICACIÓN

En la industria petrolera existen muchas herramientas de perforación de pozos, con diferentes funciones específicas ya sea de direccionamiento como de succión y extracción de crudo, estas herramientas son sometidas a muchos tipos de esfuerzos que con el paso del tiempo desgastan y terminan por dañar la herramienta generando costos adicionales en reparaciones para volver a un estado operativo, aunque estos costos en comparación con las utilidades de producción son muy pequeños se busca que la extracción de crudo sea lo más rentable posible en cuanto a eficiencia de producción como en el estado de operación de las herramientas, así que se requiere que la vida útil de las herramientas utilizadas en la perforación de cierto pozos según sus características particulares sea la más alta posible. Utilizando tecnologías especiales como la aplicación de recubrimientos duros de tungsteno se logra proteger la parte exterior del motor de perforación petrolera, lo cual aumenta la vida útil de la sarta de perforación.

El Shot Peening ofrece una alternativa de trabajo en frío sobre las superficies sometidas a arranque de viruta por procesos de maquinado principalmente por torno. Según Manuel Estrems debido al contacto existente entre la herramienta de desbaste (inserto) y la superficie a mecanizar, la fricción generada provoca daños térmicos y alteraciones metalúrgicas superficiales afectando así severamente las propiedades mecánicas (generación de tensiones superficiales) del material trabajado (ESTREMS, 2008), por eso el proceso del Shot Peening por medio de impactos con esferas a alta velocidad sobre una superficie mecanizada convierte las tensiones superficiales en esfuerzos de compresión superficial, desplazando los esfuerzos de tensión al interior de la pieza, y como los esfuerzos de compresión son más altos que los esfuerzos de tensión se requiere una mayor cantidad de esfuerzo para generar el mismo desgaste. Al ser más resistente la herramienta su vida útil final será más larga que una herramienta sin el proceso de Shot Peening y los costos de operación de la herramienta serán menores, existen casos que se reduce las dimensiones

de la herramienta y se cambian los materiales de fabricación por unos menos costosos por lo cual se invierte menos dinero en fabricaciones. Este proceso de trabajo en frío no modifica las propiedades químicas de los materiales.

La principal finalidad del proyecto es investigar y mejorar los procedimientos del proceso de Shot Peening que se lleva a cabo en las conexiones rotarias de hombro. Con esto se mejora la calidad en los procesos de fabricación de herramientas de perforación, ya que se garantiza que las herramientas que se fabriquen y se sometan a este proceso de Shot Peening tendrán una vida útil mayor a las herramientas que se fabriquen sin el proceso. Finalmente se demostrará este beneficio por medio de pruebas de falla a fatiga aplicadas a probetas con y sin proceso de Shot Peening.

### 3. OBJETIVOS

#### 3.1. GENERAL

- Establecer el manual de procedimientos para el proceso de Shot Peening que se lleva a cabo en Pemarsa S.A. para ser implementado en el proceso de fabricación de conexiones rotarias de hombro.

#### 3.2. ESPECÍFICOS

- Realizar un manual en el cual consigne todos los instructivos para la realización correcta del proceso de Shot Peening en conexiones rotarias de hombro.
- Hacer pruebas experimentales del proceso de Shot Peening de acuerdo al procedimiento previamente establecido por Pemarsa S.A. y así determinar posibles fallas y mejoras.
- Comparar resultados de la realización proceso de Shot Peening antes y después de la implementación del procedimiento realizado para así determinar ventajas y establecer mejoras en el proceso.

Ya finalizado el mejoramiento del proceso de Shot Peening se otorgara toda la información necesaria a Pemarsa S.A. para realizar de forma correcta el proceso de Shot Peening para conexiones rotarias de hombro.



## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1. EL SHOT PEENING

El Shot Peening es un proceso de trabajo en frío el cual se realiza aplicando un chorro de partículas que impactan sobre una superficie metálica, provocando una deformación plástica compresiva a su alrededor según el contorno de las partículas (normalmente esféricas). Estas partículas poseen una velocidad, dirección y un sentido los cuales determinan el grado de deformación plástica a compresión y las características específicas requeridas en el Shot Peening. En la figura 1 se puede observar el impacto de la partícula en la superficie.

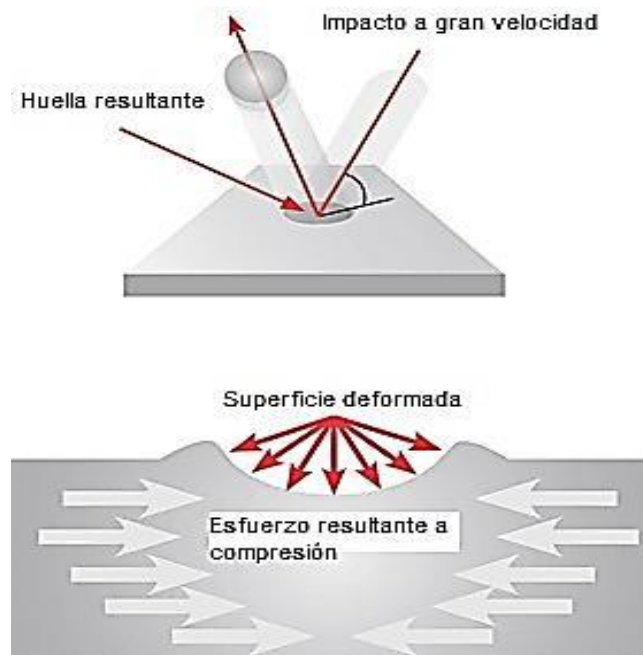


Figura 1. Impacto y huella superficial en el proceso de Shot Peening  
Fuente: WHEELABRATOR SHAPING INDUSTRY (modificada)

El chorro de partículas al golpear la superficie genera una capa homogénea de huellas las cuales distribuyen de mejor manera los esfuerzos residuales generados por los procesos de mecanizado, lijado y deformaciones por calor. La principal finalidad del proceso de Shot Peening es aumentar la resistencia a la fatiga y evitar la propagación de grietas y micro fracturas generadas por las condiciones de trabajo en la herramienta específica. También se utiliza para

realizar contornos complejos sobre láminas de calibres bajos. (JARAMILLO, 2013)

La figura 2 muestra una relación aproximada de la zona de esfuerzo residual a compresión ( $3d$ ) y la zona indentada (penetración) a causa del proceso de Shot Peening ( $d$ ).

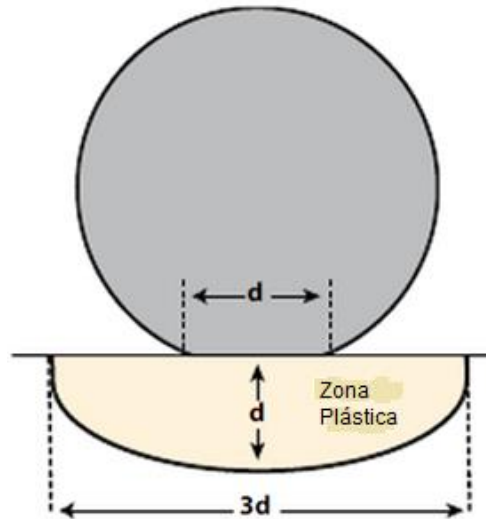


Figura 2. Relación entre la zona de esfuerzo residual y la zona indentada por Shot Peening  
Fuente: • RICK, David, Shot Peening Coverage: Prediction and Control (modificada)

El efecto de Shot Peening se asocia con el efecto del golpe de un martillo sobre una superficie metálica, en el cual las partículas están compactadas en un volumen específico, y al no tener un espacio para desplazarse de forma lateral se genera la compresión mutua entre las partículas circundantes. (Figura 3)

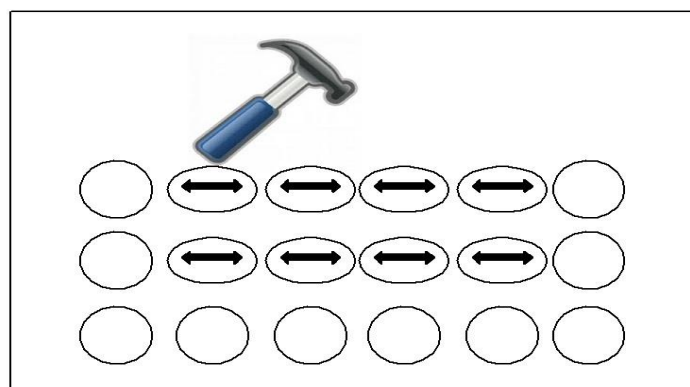


Figura 3. Efecto compresivo sobre las partículas internamente.  
Fuente: El autor

Al comprimirse internamente las partículas unas entre otras se crea un efecto de cierre, lo cual genera que se retarde la propagación de grietas y micro fracturas al interior de la pieza por efecto de las cargas a las cuales está sometida la misma. (Figura 4.) (JARAMILLO, 2013).

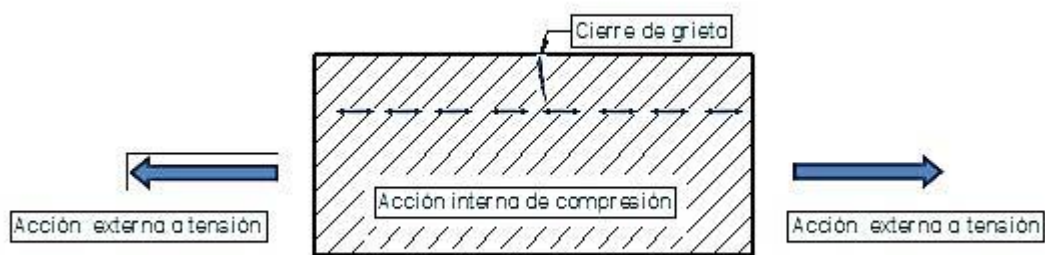


Figura 4. Efecto de cierre de grieta del Shot Peening sobre una superficie.  
Fuente: El autor

#### 4.2. INFLUENCIA DEL SHOT PEENING EN LOS ESFUERZOS RESIDUALES DE LOS MATERIALES

Según James (1996) los esfuerzos residuales son el estado de un esfuerzo presente en un material sin la aplicación de fuerzas externas después de la realización de algún proceso de manufactura, estos pueden ser clasificados según su magnitud; macroscópicos (comprenden varios granos de un material), microscópicos (comprenden un único grano de un material) y de orden atómico (separación atómica). Las principales fuentes de esfuerzos residuales son causadas por deformación plástica, procesos de manufactura y durante el calentamiento de un material. (JAMES, 1996)

Los esfuerzos residuales influyen principalmente en la resistencia a la fatiga, en la propagación de grietas y en la corrosión por esfuerzos (stress corrosion). Estos esfuerzos pueden contribuir en el aumento considerable de la resistencia

a la fatiga como pueden influir al fallo del material en ciclos cortos de trabajo. (JARAMILLO, 2013).

En el proceso de Shot Peening se crea una capa de esfuerzos residuales en la superficie del material de forma compresiva, y más allá de esta capa quedan los residuos de los esfuerzos a tensión desplazados, lo cual indica que a mayor magnitud en el esfuerzo a compresión junto con una mayor profundidad de dicha deformación se logra aumentar la resistencia a la fatiga. El valor máximo del esfuerzo a compresión que se puede obtener en el proceso de Shot Peening está en función del esfuerzo de fluencia en un material ( $S_y$ ) y la profundidad de la deformación superficial está determinada por la intensidad Almen. (Test Almen). (JARAMILLO, 2013).

El perfil del esfuerzo residual a compresión por el proceso de Shot Peening cambia con respecto a la profundidad de deformación como se muestra en la figura 5.

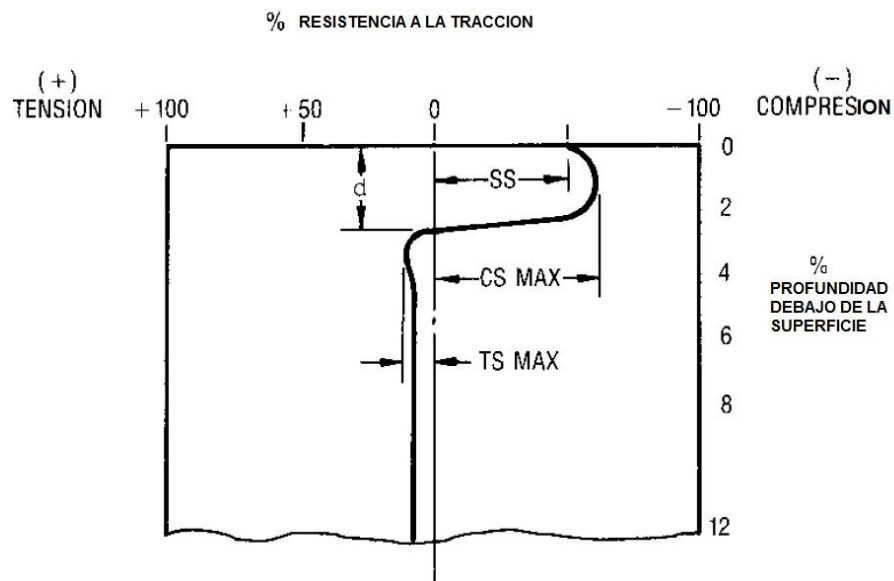


Figura 5. Representación del perfil de tensiones residuales tras un tratamiento de Shot Peening. Fuente: CHAMPAIGNE, Jack. (Modificada).

Dónde: **SS** es la tensión superficial.

$Cs_{max}$  Es el esfuerzo máximo a compresión,

$d$  es la profundidad de los esfuerzos residuales determinada en función del porcentaje del espesor total de la pieza.

$T_{s_{max}}$  Es el esfuerzo máximo a tensión.

#### 4.2.1. Perfil de esfuerzo residual

El estado de esfuerzos residuales puede verse afectado por la aplicación de cargas externas como se observa en la figura 6.

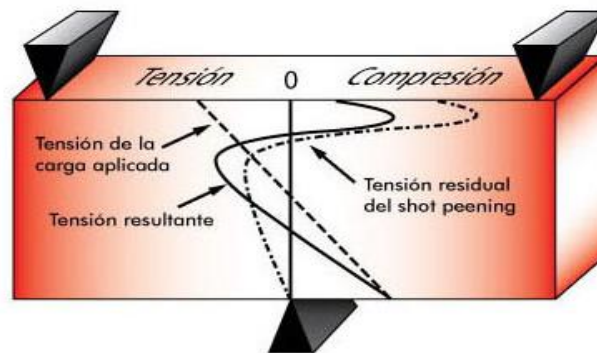


Figura 6. Perfil de esfuerzos resultantes.  
Fuente: WHEELABRATOR SHAPING INDUSTRY (modificada)

En el primer caso se observa el esfuerzo resultante de un material tras el proceso de Shot Peening ( $S_R$ ) (línea punteada) sin fuerzas externas interviniendo en él, el área bajo la curva de distribución de esfuerzos en la región de esfuerzos a compresión debe ser igual a la correspondiente área bajo la curva de esfuerzos a tensión, la suma de estas dos áreas debe ser igual a 0. Luego se observan los esfuerzos residuales tras la aplicación de una fuerza externa ( $S_P$ ) (línea segmentada) sobre el mismo material sin proceso de Shot Peening. Finalmente se observa los esfuerzos residuales totales ( $S_T$ ) tras someter al material a una fuerza externa y al proceso de Shot Peening (línea continua).

Al realizar la suma algebraica de los esfuerzos residuales de la fuerza externa y el proceso de Shot Peening se obtiene el esfuerzo residual total como se ve en la ecuación 1.

$$S_T = S_R + S_P \quad (1)$$

En este caso se observa que los esfuerzos residuales del Shot Peening (línea punteada) anulan los esfuerzos residuales de la fuerza aplicada (línea segmentada) y esto significa que los esfuerzos de compresión provocados por el Shot Peening son benéficos y actúan como anuladores de los esfuerzos a tensión que provocan grietas y micro fracturas en la superficie del material y así evitando la fatiga prematura del mismo. Se debe tener en cuenta que los esfuerzos residuales totales no deben superar los valores del límite de resistencia elástica del material ( $S_Y$ ) de lo contrario pueden haber deformaciones internas y posibles fallas del material. (JARAMILLO, 2013) (CHAMPAIGNE, 2001)

En el segundo caso (Figura 7) se observa la distribución de los esfuerzos residuales en una pieza la cual tiene una muesca en su superficie y está sometido bajo cargas a flexión. ( $K_T = 2$ ), Donde  $K_T$  es el factor teórico de concentradores de esfuerzo en el rango elástico =  $\left(\frac{\sigma_{Max}}{\sigma_{Nom}}\right)$ . La muesca concentra e incrementa dramáticamente los esfuerzos efectivos experimentados en la superficie de la pieza.

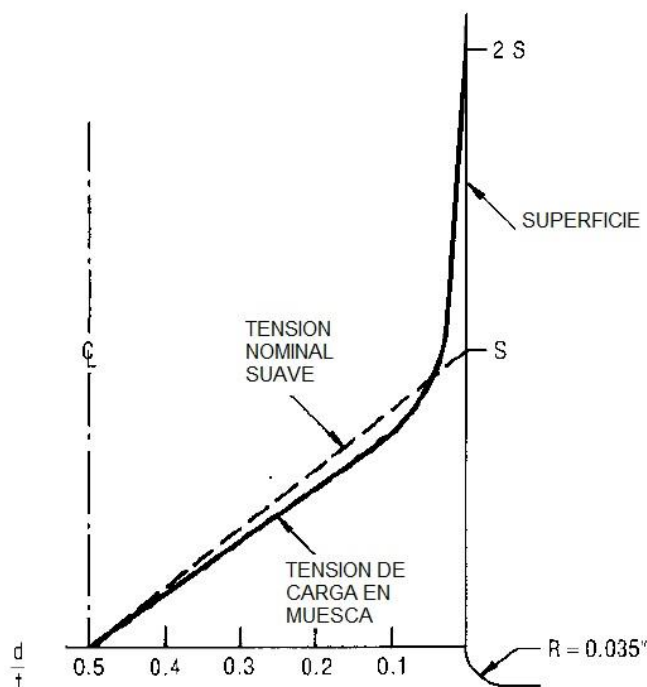


Figura 7. Perfil de esfuerzos resultantes con cargas a flexión en muesca.  
Fuente: CHAMPAIGNE, Jack. (Modificada).

En la figura 8 se observa la distribución de cargas del caso anterior después de la aplicación del proceso de Shot Peening. El Shot Peening reduce el esfuerzo experimentado en la superficie de la pieza por debajo del 50%, reduciendo principalmente el esfuerzo concentrado por el efecto de la muesca.

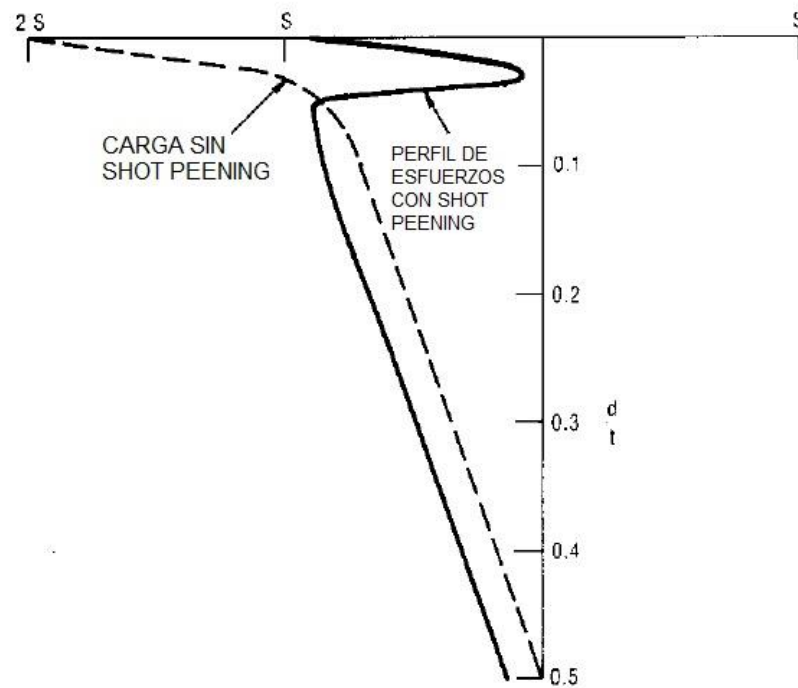


Figura 8. Perfil de esfuerzos resultantes tras proceso de Shot Peening sobre una muesca sometida a flexión.

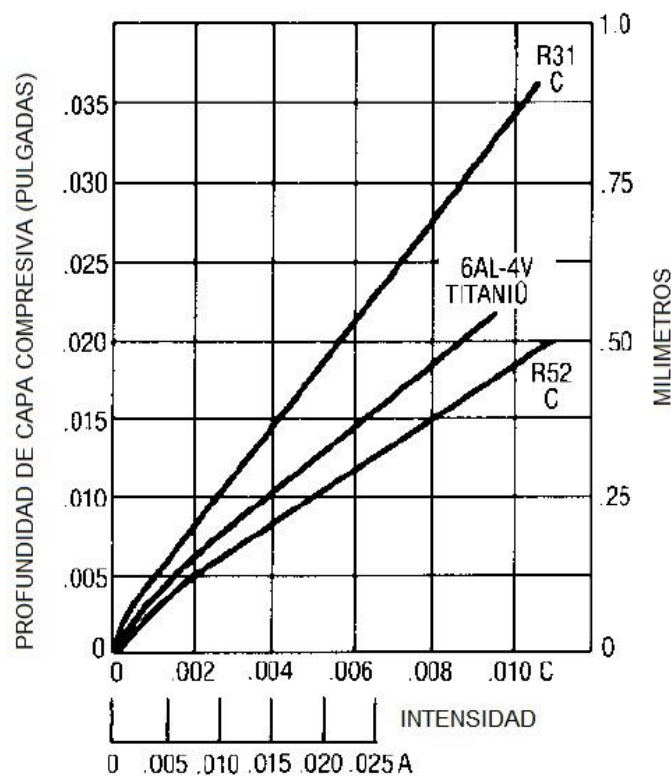
Fuente: CHAMPAIGNE, Jack. (Modificada).

#### 4.2.2. Magnitud del esfuerzo residual

El máximo valor del esfuerzo residual a compresión es también llamado como la magnitud del esfuerzo residual inducido. Cualquier variación en el proceso de Shot Peening tiene un pequeño efecto sobre la magnitud del esfuerzo a compresión inducido siempre y cuando la granalla utilizada sea tan dura o más dura que el material que está siendo granallado. La magnitud del esfuerzo a compresión inducido está principalmente en función del material mismo y tiene un valor de al menos la mitad del límite elástico ( $S_y$ ) de material granallado.

La profundidad de la capa de compresión es influenciada por la variación de los parámetros de granallado. En la figura 9 se puede ver la relación entre la profundidad de la capa compresiva y la intensidad del Shot Peening para tres materiales de la siguiente forma (CHAMPAIGNE, 2001):

- Acero con una dureza de 31 HRc
- Acero con una dureza de 52 HRc
- Titanio 6Al-4V.



**Figura 9. Relación entre la profundidad de la capa compresiva y la intensidad del Shot Peening para tres aceros con diferentes durezas. Fuente: CHAMPAIGNE, Jack. (Modificada).**

Donde se puede observar que la mayor profundidad de penetración del Shot Peening se logra con el material que tiene la menor dureza superficial, esto se aprecia para los diferentes valores de intensidad utilizados en el Shot Peening y quiere decir que este material va a obtener una mayor resistencia a la fatiga con respecto a la resistencia a la fatiga original del material.



#### 4.2.3. Medición de los esfuerzos residuales

La medición de los esfuerzos residuales en el Shot Peening es muy importante ya que a partir de los valores obtenidos se puede controlar las variables para obtener un adecuado proceso. Estas mediciones del esfuerzo residual se pueden obtener a partir de medición directa y medición indirecta. Además se pueden clasificar en métodos de ensayo destructivo (Hole drilling, ring core, seccionado, entre otros.) y no destructivos (Difracción de rayos X, difracción de neutrones, métodos magnéticos y métodos de ultrasonido.)

Factores como la destrucción o no de la muestra, el costo de los equipos, la precisión del análisis, el tiempo de realización de las pruebas y la profundidad del análisis, son los más importantes para la selección del método adecuado de medición de esfuerzos residuales.

En la siguiente tabla se muestra los métodos de medición de esfuerzos residuales más utilizados y sus características para la selección del proceso. (JARAMILLO, 2013) (Tabla 1).

Para el caso del proyecto, se van a realizar pruebas de falla a fatiga a probetas con proceso de Shot Peening vs probetas sin proceso de Shot Peening, así evidenciar el aumento de la resistencia a la fatiga en las probetas tratadas.

Método	Parámetros de medida	Penetración	Zona de análisis mínima	Duración		Sistema portable	Costo del equipo (\$US)	Precisión (MPa)	Observaciones
				Primer punto sobre la superficie	Perfil de esfuerzos de algunos mm				
Hole Drilling	Deformación superficial o desplazamiento	0,02mm - 15mm	0,5 mm <sup>2</sup>	40min	2 h	si	10000 - 50000	±20	Semi-destructivo
Difracción de rayos X	Medida atómica de deformación	1 - 50 μm para medidas no destructivas y 10mm para medidas destructivas	0,5 mm <sup>2</sup>	20min	8h	si	100000 - 200000	±20	No destructivo (se remueven partículas de la superficie)
Difracción de neutrones	Medida atómica de deformación	2mm - 50mm	4 mm <sup>2</sup>	2 h	2 semanas	no	Algunos cientos de millones	±30	No destructivo, análisis 3D
Ultrasonido	Cambio en la velocidad de ondas	0,015mm - 3mm	Método de alta frecuencia 0, 1 mm <sup>2</sup> , metodos convensionales 30mm <sup>2</sup>	Algunos minutos	20 min	si	40000 - 200000	10 -20.	Sensible a la microestructura
Magnético	Amplitud de ruido magnético o permeabilidad magnética	0,1mm - 1mm	Desde 1mm <sup>2</sup> para metodo Barkhausen noise. Desde 100mm <sup>2</sup> para el metodo de permeabilizacion magnetica.	Instantáneo	10 min	si	30000 - 60000	10 - 20.	Sensible a la microestructura (materiales magnéticos únicamente)

Tabla 4. Características principales de los diferentes métodos de medición de esfuerzos residuales.  
Fuente: El autor

El aumento de la resistencia a la fatiga se ve reflejada en el texto de HOFF-NNANJ donde realiza un ensayo y se muestra la curva S-N para un acero CK-45 que ha sido templado y revenido (600°C por cada 2h), este acero es sometido bajo cargas alternantes, y se realiza esta prueba para probetas antes y después de la realización del proceso de Shot Peening. (Figura 10). (HOFF-NNANJ, 1987)

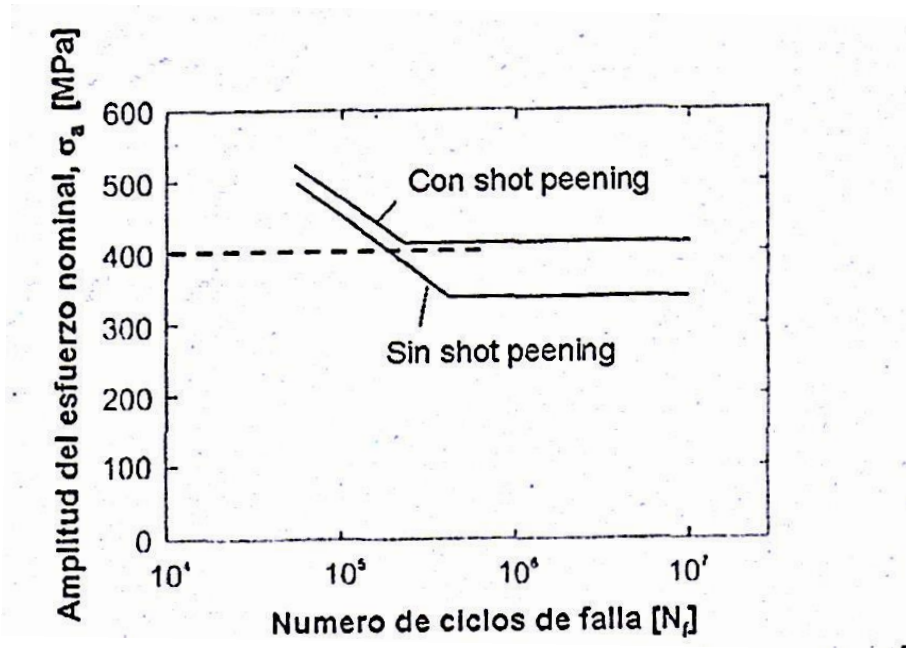
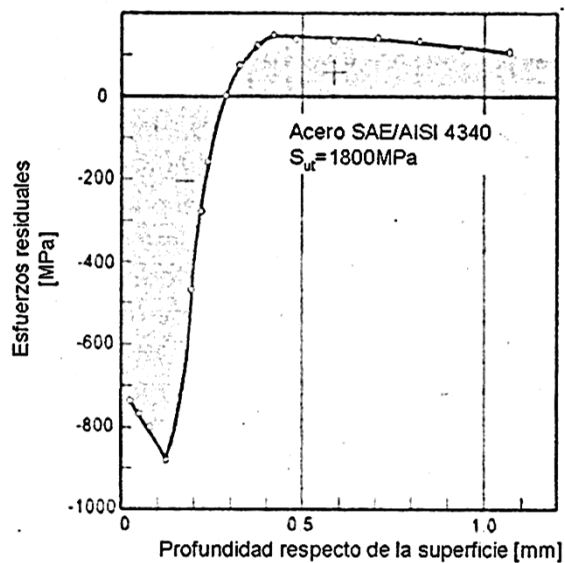


Figura 10. Curva S-N para una probeta de acero Ck-45 templada y revenida (600°C cada 2h) bajo cargas alternantes antes y después de aplicación de Shot Peening  
Fuente: HOFF-NNANJ, 1987

Donde se puede observar que para una amplitud del esfuerzo de 400MPa, la probeta sin proceso de Shot Peening resiste poco más de  $10^5$  ciclos bajo dicho esfuerzo, mientras que la probeta del mismo material con proceso de Shot Peening supera su valor límite de esfuerzo a la fatiga (mayor a  $10^7$  ciclos) adquiriendo así vida infinita bajo estos esfuerzos alternantes.

Otro ejemplo se puede ver en la figura 11 donde se ve la distribución de esfuerzos residuales obtenidos por proceso de Shot Peening, para un acero 4340 de alta resistencia y sensibilidad a la fatiga. (JARAMILLO, 2013).



**Figura 11. Esfuerzos residuales introducidos por el Shot Peening para un acero AISI/SAE 4340 tratado térmicamente con un valor de  $S_{ut} = 1800 \text{ MPa}$**   
Fuente: JARAMILLO, 2013

Los ingenieros de la NASA estudiaron la propagación de la grieta en una aleación de aluminio 2024-T3 con y sin Shot Peening. Las probetas fueron sometidas a pruebas con un inicio de grieta de 1,3mm y después sometidas a un ciclo de fatiga hasta rotura. Según la NASA se tolera hasta grietas de 1,3mm en deterioramiento de piezas. Fue demostrado que la propagación de la grieta fue atrasada notablemente cuando las probetas son sometidas bajo proceso de Shot Peening. Como lo muestra el resultado siguiente, bajo una tensión resultante de 104MPa la duración de vida útil restante aumenta un 237%. Con 138MPa, la duración de la vida útil restante es un 81% más. (Tabla 2). Para la preparación de las probetas se realiza una entalla en la superficie por electro erosionado. Después se someten las probetas a fatiga hasta que las grietas lleguen a una profundidad de 1,3mm. Las probetas se someten al Shot Peening únicamente después de haber realizado la grieta. (DUBBERLY, 2000).

PROBETA SIN SHOT PEENING			PROBETA CON SHOT PEENING			
Tensión aplicada	Numero de ensayos	Media números ciclos	Tensión aplicada	Numero de ensayos	Media números ciclos	Aumento
104Mpa	2	75017	104Mpa	2	253142	237%
138MPa	3	26029	138MPa	3	47177	81%

**Tabla 5. Ciclos de falla para probetas de aluminio 2024-T3 con y sin proceso de Shot Peening**  
Fuente: El autor

### 4.3. CONTROL DEL PROCESO DE SHOT PEENING

Las técnicas de control, como la medición de los esfuerzos residuales requieren el sacrificio de una pieza para obtener el perfil de esfuerzos resultantes vs profundidad. Para asegurarse de la realización de todas las especificaciones sobre las piezas a realizar Shot Peening, existen los siguientes controles que se deben realizar de forma permanente: (METAL IMPROVEMENT COMPANY. INC, 2001)

- Intensidad Almen
- Cobertura
- Granalla de Shot Peening
- Máquinas y equipos.

#### 4.3.1. Intensidad Almen

La intensidad en el proceso de Shot Peening es la magnitud de energía que se transmite del flujo de granalla a la pieza impactada. Este es uno de los parámetros esenciales para asegurar la reproductividad y repetitividad del proceso de Shot Peening.

La intensidad se ve reflejada en las propiedades del impacto de la granalla sobre la pieza tratada con el proceso de Shot Peening, estas propiedades son:

- Velocidad de impacto
- Masa de granalla
- Dureza de granalla
- Angulo de impacto.

Para realizar la comprobación de la intensidad en el proceso de Shot Peening se utiliza un método creado por J. O. Almen del laboratorio de investigaciones de GENERAL MOTORS CORP., en 1930 y que ha sido aceptado como el mejor método de comprobación de la intensidad del Shot Peening hasta ahora,

mediante la medición del arco que forma una placa de acero normalizada al ser expuesta una cara al proceso de Shot Peening.

Basado en estos principios The Society Automotive Engineers (SAE) ha adoptado las siguientes normas para la medición de la intensidad del Shot Peening (WHEELABRATOR CORP, 1959) :

- Test Strips, Holding Block and Gauge for Shot Peening. SAE J442.
- Procedures for Using Standard Shot Peening Test Strip. SAE J443.

(WHEELABRATOR CORP, 1959)

#### 4.3.1.1. Tira de prueba (test strip)

Para la medición de la intensidad Almen se utiliza una serie de tiras llamadas tiras Almen, existen tres diferentes tipos los cuales son: A, N, C. (Figura 12).

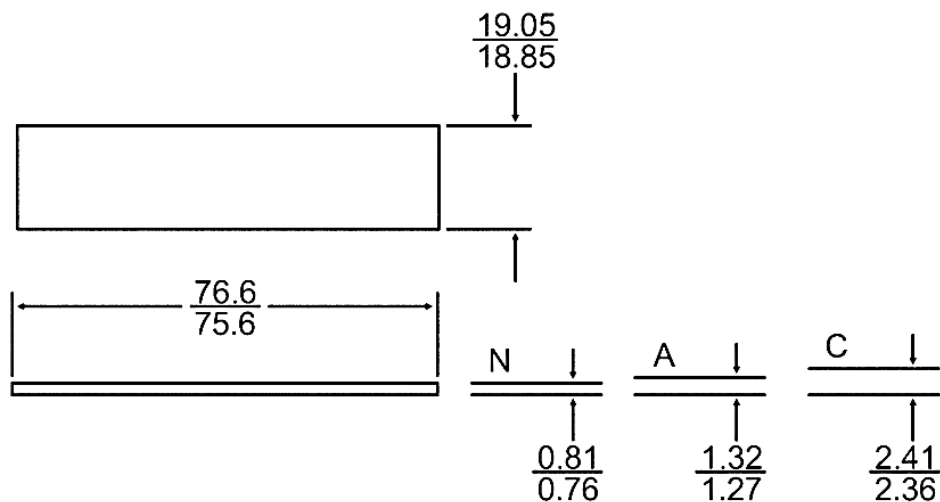


Figura 12. Especificaciones dimensionales de Tiras de prueba Almen (unidades en mm).  
Fuente: SAE J442, 2001.

Para el proceso de Shot Peening en conexiones rotarias de hombro se utiliza la tira de prueba A ya que la tira básica equivalente sobre las otras dos según SAE J442. La relación aproximada que hay entre la lectura de las tres tiras Almen (para condiciones de disparo y de exposición idéntica de Shot Peening) es:

- La lectura de la tira C x 3,5 = Lectura de la tira A
- La lectura de la tira A x 3 = Lectura de la N

Las especificaciones de las tiras de prueba Almen en general son las siguientes:

- Planitud: Medida de lectura del medidor Almen para cada una de las tiras de prueba Almen como se muestra de la siguiente forma:
  - N – 0,025mm
  - A – 0,025mm
  - C – 0,038mm
- Material: Acero para resortes SAE 1070 rolado en frio.
- Tipo de borde: Redondo 1mm
- Acabado superficial: Templado liso, todas las rebabas eliminadas.
- Tratamiento térmico: Todas las tiras deben estar uniformemente endurecidas y templadas a una temperatura mínima de 371°C (700°F) para producir un templado martensítico con una dureza superficial de 44-50 HRC (72,5-76 HRA para la tira N).
- Superficie: Las tiras deber estar libres de alteraciones de carbono en la superficie al grado de que alguna diferencia en el promedio de la dureza entre la superficie y la subsuperficie no debe exceder dos puntos de medida en la escala de dureza Rockwell 30-N. El promedio de las ultimas 4 lecturas en cada región debería ser usada como punto de comparación. Alguna de las mediciones debe ser hecha en las tiras de prueba que no han sido tratadas con el proceso de Shot Peening. La lectura de la dureza superficial al ser menor que la lectura de la dureza subsuperficial, indica una evidencia de descarburación. La lectura de dureza superficial al ser mayor a la correspondiente lectura de la dureza subsuperficial, indica una evidencia de carburación.
- Ejemplo: Si el promedio de la dureza superficial es 62,5 en la escala 30-N de Rockwell, y después de un desbaste de material cuidadoso, la región debajo de la superficie es medida y arroja una dureza de 64 en la escala 30-N de Rockwell la tira es aceptada. Si la lectura de la

subsuperficie hubiera sido de 65 en la escala 30-N de Rockwell, la diferencia (2,5 puntos) estaría por encima de dos puntos que constituye motivo de rechazo.

#### 4.3.1.2. Accesorio de sujeción

El accesorio de sujeción debe ser como se muestra en la figura 13.

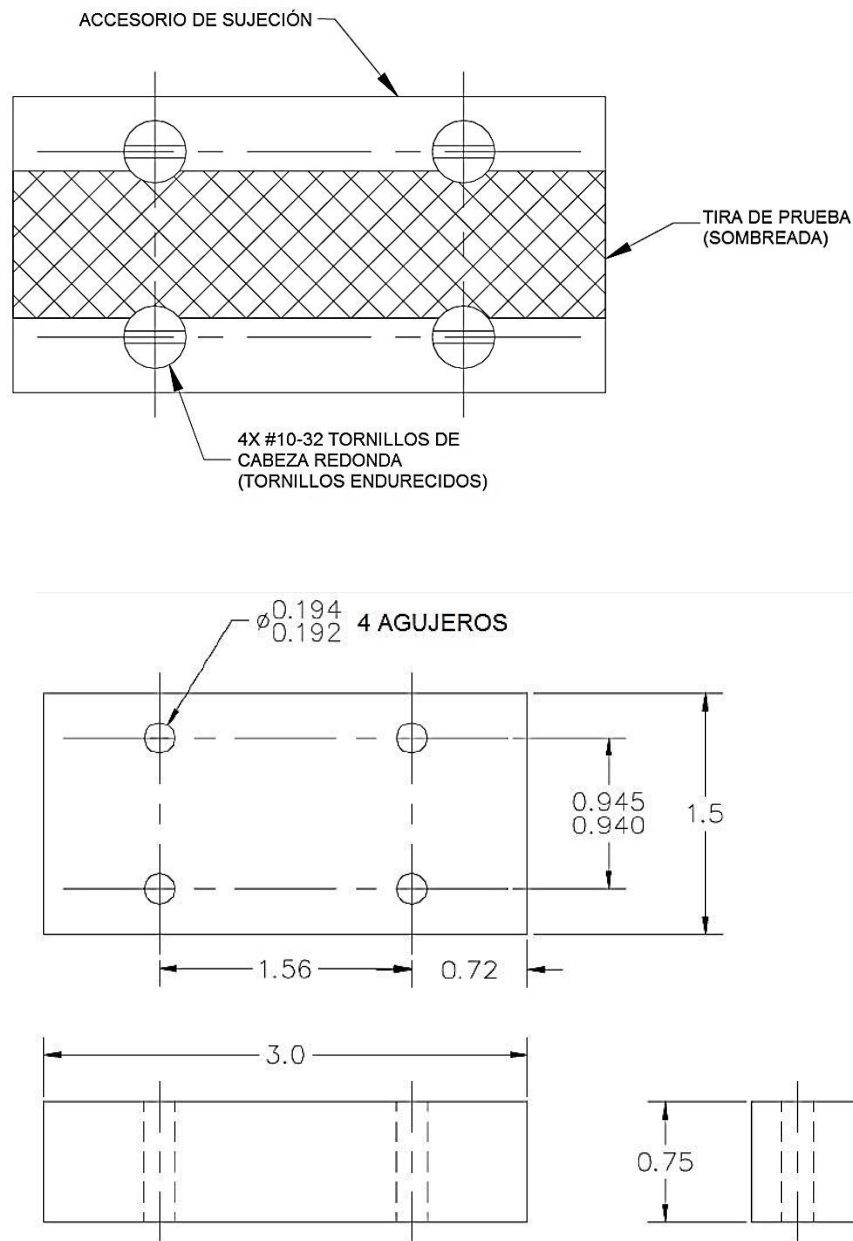


Figura 13. Especificaciones dimensionales de accesorio de sujeción para test Almen (unidades in)  
Fuente: SAE J442, 2001. (Modificada).



Se recomienda utilizar para el material del accesorio de sujeción algún acero al carbón, endurecido a 57 HRC y una profundidad mínima de endurecimiento de 0,7mm. Materiales y espesores alternativos pueden ser usados siempre y cuando su uso y características de deformación no afecten negativamente el rendimiento de la tira de prueba Almen.

#### 4.3.1.3. Almen gauge

La galga (Almen gauge) para determinar la curvatura de la tira de prueba Almen debe estar compuesta de los componentes necesarios como se muestra en la figura 14

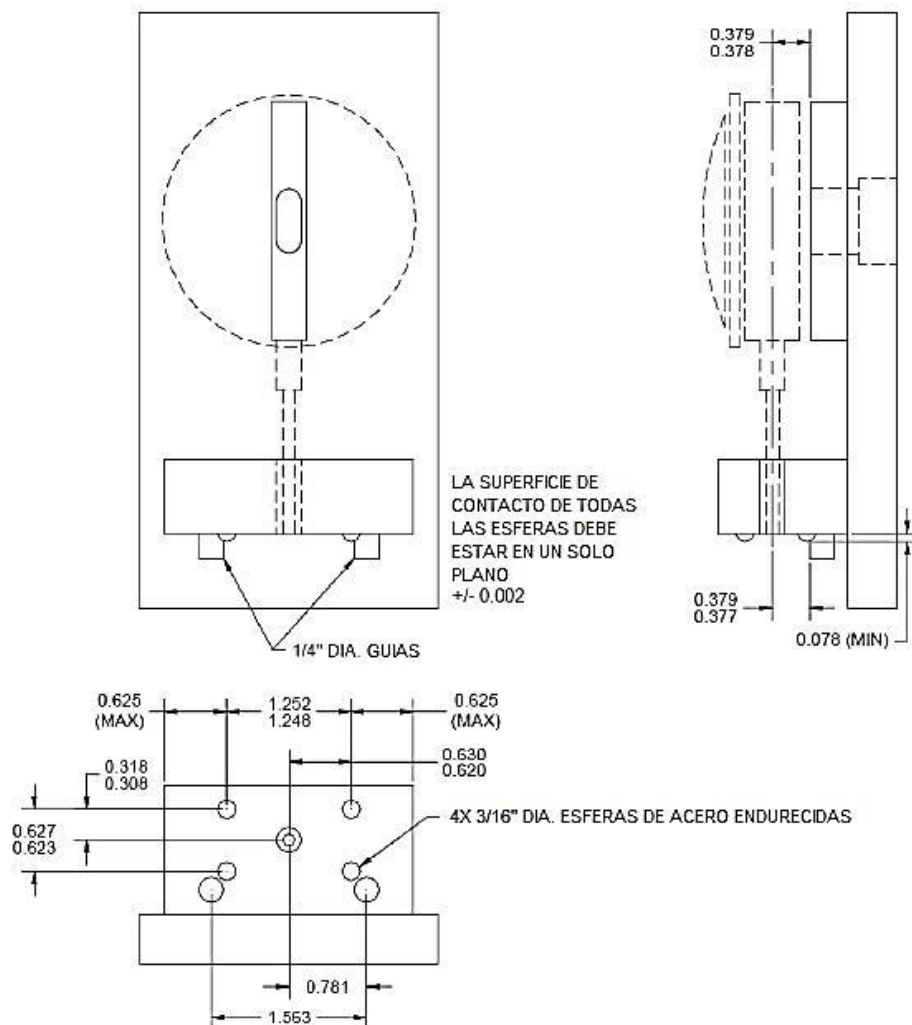


Figura 14. Especificaciones dimensionales para Almen Gauge (unidades in)  
Fuente: SAE J442, 2001. (Modificada).

La curvatura de la tira de prueba Almen es determinada por una medición de la altura del arco longitudinal y transversal combinado de acuerdo a la norma J442. Esta altura de arco es obtenida por la medición del desplazamiento de un punto central en una superficie sin Shot Peening desde el plano de las esferas que forman las cuatro esquinas de un rectángulo particular. Para utilizar esta galga, la tira de prueba Almen está localizada, de tal forma que los soportes en el husillo del indicador estén contra el centro de la superficie sin Shot Peening, uno de los dos bordes longitudinales deben estar apoyados contra los dos toques traseros. La tira de prueba Almen es centrada mediante la colocación de los extremos con el borde de la base.

#### 4.3.1.4. Designación estándar para la medición de la intensidad

La designación estándar para la medición de la intensidad Almen está dada por la lectura de la galga (Almen gauge) y la tira de prueba Almen. (Figura 15)



**Figura 15. Designación estándar de la medición de la intensidad Almen (unidades en mm).**  
Fuente: SAE J442, 2001. (Modificada).

La figura nos muestra que la lectura de la galga (Almen Gauge) en la tira de prueba Almen tipo A con shot peening es de 0,335mm. Para la medición de las galgas (Almen gauge) que estén en pulgadas (Sistema ingles) se puede presentar mediante la siguiente figura (Figura 16).



**Figura 16. Designación alternativa para la medición de la intensidad Almen (unidades en in)**  
Fuente: SAE J442, 2001. (Modificada).

La tabla 3 muestra que la lectura en la Galga (Almen gauge) de la tira de prueba Almen tipo A es de 0,0132in. (SAE J422, 2001). En la figura 34 se muestran las conversiones de sistema internacional y sistema inglés para la medición de la intensidad Almen.

INTENSIDAD DEL SHOT PEENING (GRADO ALMEN)	TIPO DE TIRA DE PRUEBA	VALOR DE LA CURVA EN mm		
4N 6N 8N 10N	N	0·10 0·15 0·20 0·25		
12N 14N 16N 18N		0·30 0·35 0·40 0·45		
6A 8A 10A 12A 14A		A	0·15 0·20 0·25 0·30 0·35	
16A 18A 20A 24A			0·40 0·45 0·50 0·60	
7C 9C 11C 13C 15C			C	0·18 0·23 0·28 0·33 0·38
17C 19C 21C 23C				0·43 0·48 0·53 0·53

Tabla 3. Escala de intensidades de Shot Peening.  
Fuente: SAE J442, 2001. (Modificada).

La intensidad Almen esta expresada como la altura del arco de una tira de prueba Almen después de haber realizado el proceso de Shot Peening.

#### 4.3.1.5. Saturación

Un gráfico del tiempo de Shot Peening vs la altura del arco es usado para definir la saturación. Por medio de la realización del Shot Peening a una serie de tiras de prueba Almen, usando tiempos cada vez más largos entre tira y tira de prueba, y manteniendo todas las otras condiciones de Shot Peening constantes, es que se realiza la serie de puntos en la gráfica de tiempo de exposición vs la altura del arco para así desarrollar una curva como se observa en la figura 17.

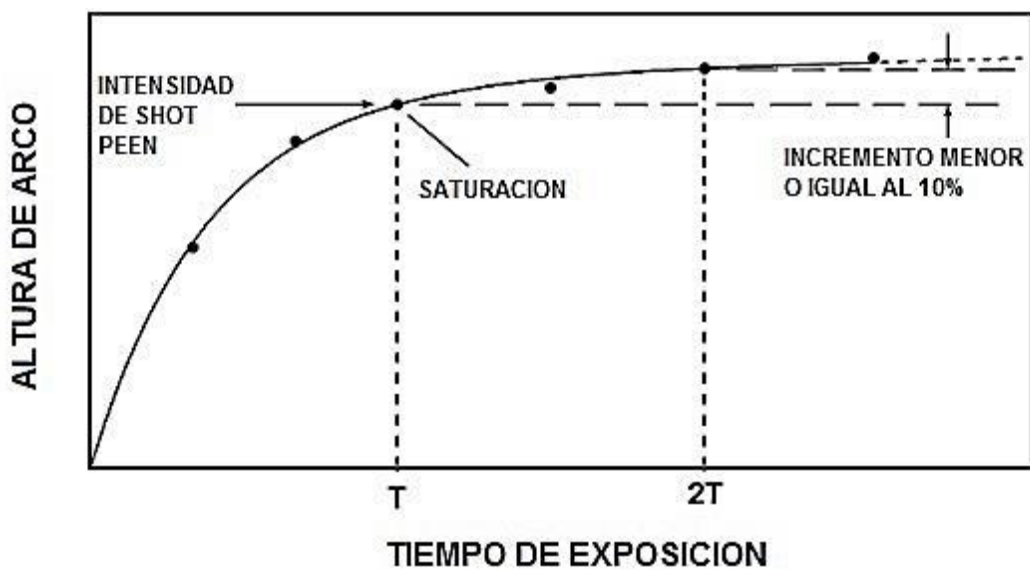


Figura 17. Curva de saturación del Shot Peening.  
Fuente: SAE J442, 2001. (Modificada).

La saturación se alcanza cuando en el doble del tiempo determinado, se obtiene un aumento igual o menor del 10% en la altura del arco de la tira prueba Almen con respecto a un punto anterior en la gráfica realizada. Esto quiere decir que para un tiempo  $T$  se obtiene una altura de arco  $X$ , luego se aumenta el tiempo de exposición a un tiempo  $2T$  y se obtiene una altura de arco  $Y$ , si la resta entre  $Y$  y  $X$  es menor o igual al 10% del equivalente en porcentaje de la altura del arco en el punto  $X$  se dice que la intensidad corresponde a la altura del arco es la de ese punto  $X$ . Sin embargo, si la resta entre el punto  $Y$  y  $X$  es mayor al 10% del equivalente en porcentaje a la altura del arco en el punto  $X$ , entonces se procede a obtener un nuevo punto  $X$  y  $Y$

#### 4.3.1.6. Procedimiento basado en la relación de la altura del arco vs tiempo de exposición.

En general, antes de su uso, la posición de punto 0 de la galga (Almen Gauge) se comprobaba con un bloque de calibración plano según SAE J442. Las tiras de prueba también deben ser revisadas y comprobar su planitud antes de ser usadas.

- Sujete la tira de prueba Almen fuertemente y centralice al accesorio de sujeción. Evitar el atrapamiento de cualquier cuerpo extraño en los tornillos de sujeción.
- Exponer la cara X según SAE J442 de la tira de prueba Almen al proceso de Shot Peening que se desea medir.
- Remover la tira de prueba Almen del accesorio de sujeción y medir la altura del arco en la galga (Almen gauge), asegurando que los vástagos del indicador estén haciendo contacto con la cara de Shot Peening de la tira de prueba Almen.
- Usando diferentes tipos de exposición, repetir los pasos 1,2 y 3 de manera adecuada (mínimo con 4 tiras de prueba Almen) para determinar una curva de saturación como se observa en la figura 35. (generalmente los tiempos de exposición se doblan entre sí 10s, 20s, 40s, 80s).
- La intensidad del Shot Peening es determinada por la interpretación de la curva. La intensidad es el valor de la altura del arco en un tiempo T que se incrementa un 10% o menos cuando el tiempo de exposición se duplica a 2T. la gráfica puede ser construida usando un mínimo de cuatro puntos diferentes a parte del punto 0.
- Las tiras de prueba granalladas en un tiempo T o mayor deben mostrar una cobertura uniforme. Este requerimiento asegura que la porción de la superficie X (según SAE J442) exclusivamente la parte debajo de los tornillos de sujeción no se han protegido con Shot Peening. Cabe mencionar que el tiempo de cobertura no se debe asociar con el tiempo de saturación de la tira de prueba Almen.

#### 4.3.1.7. Configuración de proceso de medición de intensidad Almen para procesos de producción.

El procedimiento que se utiliza en la realización del Shot Peening para un proceso producción, en la que se requiere un ajuste de máquina para determinar la intensidad Almen deseada, se debe hacer de la siguiente forma:

- Proporcionar el accesorio de sujeción de la tira de prueba Almen de una manera que simule las superficies seleccionadas para el proceso de Shot Peening. El accesorio de sujeción (según SAE J442) se monta en la pieza para imitar el ángulo de disparo y la ubicación de las áreas de Shot Peening. La configuración debe ser calificada al colocar el accesorio de sujeción con la tira de prueba Almen en la pieza para simular la misma orientación de la corriente de disparo de Shot Peening a la cual va ser expuesta durante el procedimiento. Se ajustara la presión de aire o la velocidad de la rueda para producir la intensidad deseada. La posición de la boquilla o de la jaula de la rueda debe establecerse de tal manera que la corriente de lanzamiento tenga un ángulo de incidencia entre los  $45^{\circ}$  y  $85^{\circ}$  a la superficie de la tira de prueba Almen. (Figura 18)



Figura 18. Configuración de accesorio de sujeción con tira de prueba Almen en pieza a tratar con proceso de Shot Peening.

Fuente: Fuente: METAL IMPROVEMENT COMPANY, 2001

- La intensidad se determinara por la exposición individual de la tira de prueba Almen en cada ubicación en el dispositivo de tira de prueba Almen para aumentar los periodos de tiempo y el trazado de los resultados de cada ubicación en la curva de saturación (ver figura 18). La reutilización de las tiras de prueba Almen no está permitida para este proceso.
- Si la medida de la intensidad obtenida en esta curva no se encuentra dentro de la tolerancia especificada, los cambios en la configuración del equipo o de las características del Shot Peening son permisibles. Repetir los dos pasos anteriores hasta que la medida intensidad este dentro de las tolerancias especificadas.

#### 4.3.1.8. Proceso de control de la intensidad

Cuando la configuración de la maquina es la adecuada y se obtenga una medida de intensidad que este dentro de las tolerancias especificadas, se aplicara un medio de verificación y control para este proceso. Las lecturas de confirmación serán tomadas con una frecuencia determinada para garantizar una adecuada intensidad en el proceso de Shot Peening. La confirmación de la intensidad del Shot Peening se logra mediante la realización del proceso en una tira de prueba Almen en el tiempo T, como determine la curva de saturación previamente establecida. La altura del arco de la tira de prueba Almen será la intensidad especificada para esta pieza.

#### 4.3.1.9. Recomendaciones

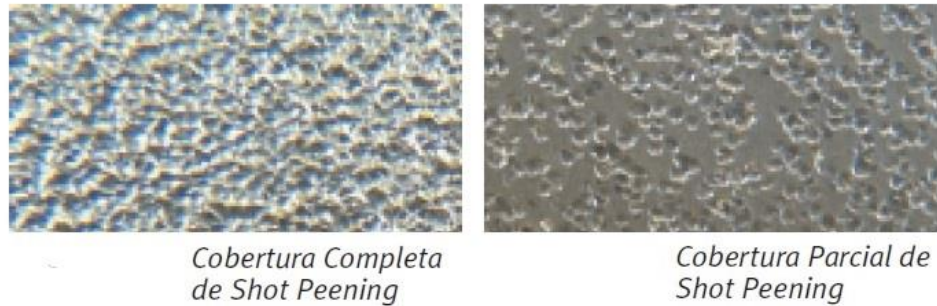
Esta norma SAE de prácticas recomendadas provee un procedimiento uniforme del uso de los estándares para la realización de la prueba de intensidad con los elementos necesarios según la norma SAE J442. Las tiras de prueba estándar son usadas para establecer la saturación, determinar la intensidad, y monitorear la repetitividad de la máquina de Shot Peening, y puede ser usada

para predecir y decidir los resultados en esta parte. Se recomienda que la tira de prueba estándar A se use para intensidades que produzcan una altura de arco de 0,10mm (0,004in) a 0,60mm (0,024in). Para intensidades menores de 0,10mm (0,004in), la tira de prueba estándar N es recomendada, y para intensidades mayores de 0,6mm (0,024in), la tira de prueba estándar C es recomendada. (SAE J443, 2003).

#### 4.3.2. Cobertura

La cobertura es definida como el porcentaje de la superficie que ha sido impactada por el proceso de Shot Peening por lo menos una vez con respecto a la superficie inicial de la pieza. Sin embargo es muy complicado obtener mediciones de cobertura mayores de un 98%, por lo tanto se denomina cobertura total o completa a un valor de cobertura de por lo menos un 98%. El tiempo mínimo requerido para lograr una cobertura del 98% es determinado por el aumento gradual del tiempo total de Shot Peening hasta que toda la superficie que está siendo granallada sea expuesta a marcas de los impactos de las esferas sobrepuestas. Para valores de cobertura mayor a la cobertura total como 150%, 200%, 300%, etc. Se obtiene multiplicando el tiempo de exposición requerido para una cobertura total (98%) por el número de veces que aumenta la cobertura con respecto a la cobertura total. Un valor de cobertura mayor que la cobertura total no puede ser inspeccionada visualmente por los métodos descritos en la norma SAE J2277. La cobertura nunca debe ser menor del valor de cobertura total 98%, ya que se pueden desarrollar grietas de baja tensión y fallas por fatiga en las zonas que no han sido atacadas por el Shot Peening, la figura 19 muestra la diferencia entra una cobertura parcial de Shot Peening y una cobertura completa de Shot Peening.





**Figura 19. Cobertura parcial vs cobertura total en el proceso de Shot Peening.**  
Fuente: METAL IMPROVEMENT COMPANY, 2001

El tiempo para alcanzar la cobertura total no debe confundirse con el tiempo que se referencia en la norma SAE J443 para determinar la intensidad/saturación del Shot Peening porque las formas y las durezas de las piezas a tratar son diferentes a las tiras de prueba Almen. Cuando todos los otros factores no son alterados, las superficies suaves típicamente requieren menos tiempo de Shot Peening para alcanzar la cobertura total con respecto a las superficies duras, ya que el tamaño de cada huella de la superficie suave es más grande.

#### 4.3.2.1. Determinación de la cobertura

La determinación de la cobertura se realiza en la respectiva área a realizar el Shot Peening. Estas áreas incluirán regiones con formas que son de difícil acceso. La toma de muestras de las piezas granalladas será requerida por especificación del proceso de Shot Peening. La cobertura puede ser determinada usando alguno o combinando los siguientes procedimientos:

- Inspección visual – Inspeccionar visualmente usando una magnificación superficial de 10x a 30x. Cuando la cobertura visual con aumento de 10x a 30x no es limpia, es recomendable utilizar uno de los métodos alternativos nombrados a continuación.
- Trazadores fluorescentes – Estas trazas son un tipo de recubrimiento que se aplica a las piezas antes del proceso de Shot Peening. Después

del Shot Peening, la cantidad del revestimiento removido en una indicación visual de la cobertura de la pieza actual.

- Antes del Shot Peening, aplicar una capa en las áreas representativas de la pieza o piezas de muestra de acuerdo con las prácticas recomendadas por los procesos de manufactura. Después del proceso de Shot Peening inspeccionar las superficies con Shot Peening con una magnificación de 10x a 30x para verificar el nivel de requerimiento de cobertura. Luego ver la misma superficie bajo luz ultravioleta en una zona oscura para determinar la cantidad de capa de trazas eliminada.
- La cantidad de capa eliminada posteriormente en las piezas con Shot Peening será comparada con la cantidad de capa removida de la muestra preparada en el paso anterior. Las partes que exhiban más residuos fluorescentes que la pieza de muestra están cubiertas de forma inadecuada, y serán examinadas visualmente con aumentos de 10x a 30x.
- Se debe tener en cuenta que la eliminación completa de la capa de trazas puede o no que coincida con la cobertura visual completa. (Figura 20).

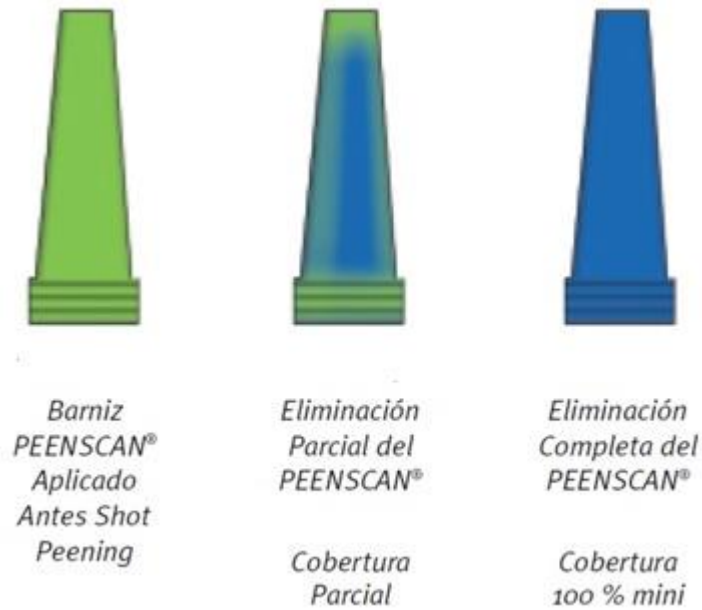


Figura 20. Método de inspección de cobertura por trazas fluorescentes.  
Fuente: METAL IMPROVEMENT COMPANY, 2001.

- Marcadores de tintes colorantes – Estos marcadores de tintes pueden ser usados de la misma forma descrita para las trazas fluorescentes con inspección de luz blanca.
- Replicas – Después de una pieza ha sido tratada con Shot Peening, una réplica de la superficie puede ser fabricada. Esta replica puede ser proyectada en una pantalla y comparar con otras replicas, teniendo varios grados conocidos de cobertura. (Figura 21).

La efectividad del Shot Peening depende directamente de la cobertura. Una cobertura escasa o en exceso puede ser perjudicial para la fatiga. (SAE J2277, 2003).

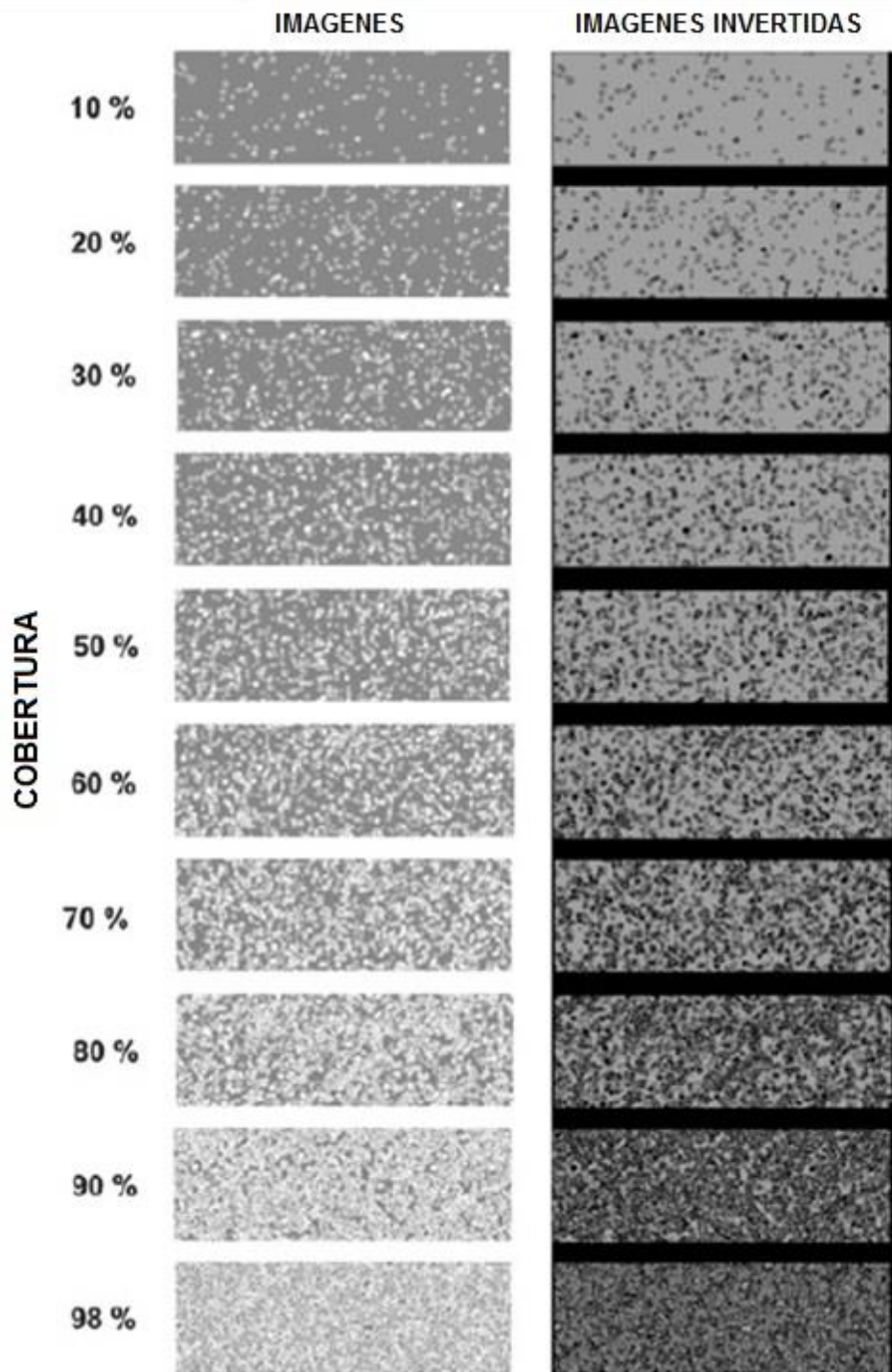


Figura 21. Replica de referencia para porcentajes de cobertura normalizados de Shot Peening.  
Fuente: RICK, David, Shot Peening Coverage Requirements, 2012.

#### 4.3.2.2. Causa y efecto en la cobertura

Según David Rick, la cobertura en el proceso de Shot Peening es un ejemplo de “causa y efecto”. Es causada por el impacto de partículas de granalla que generan una zona de impactos casi aleatoria. Esto genera el efecto de cobertura en los componentes, de una mayor o menor extensión.

La cobertura se define como:

$C\% =$  El porcentaje de superficie que ha sido impactada al menos una vez

La relación entre el área impactada y el área objetivo es  $A_r$ :

$A_r =$  Area impactada / Area objetivo .

En la figura 22 se muestra la diferencia entre los parámetros causa y efecto. En ella se muestra un modelo de impactos circulares distribuidos aleatoriamente, equivalentes a una fotografía de un área con Shot Peening. La cobertura asociada, resulta ser un 63%. El área total de los impactos dentro del rectángulo, excluidos los superpuestos, es igual al área del rectángulo. Así, el radio de área de impacto  $A_r$  es 1.

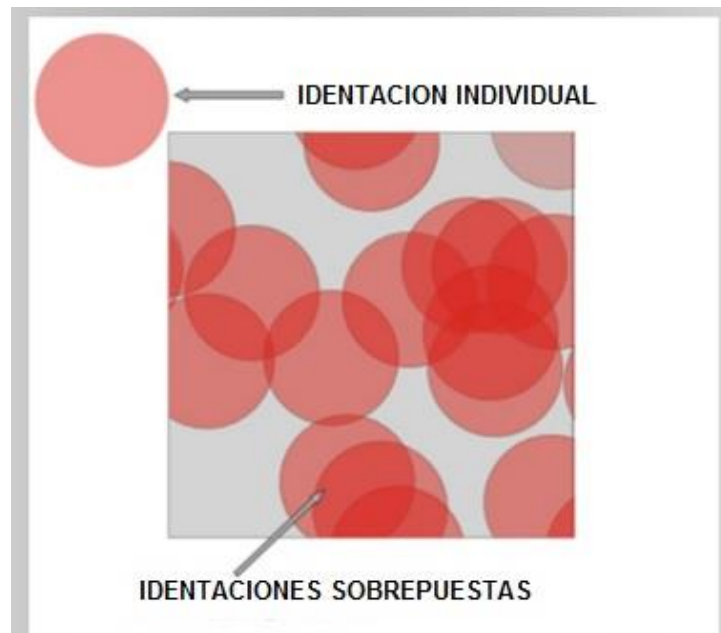


Figura 22. Fotografía de una cobertura de 63% en un área bajo Shot Peening.  
Fuente: RICK, David, Shot Peening Coverage: Prediction and Control, 2012.

El área total de los impactos sobre el área objetivo,  $A_r$ , puede ser considerado como la cantidad de veces de Shot Peening a realizar por unidad de área, para conseguir la correspondiente cobertura.

#### 4.3.2.2.1. Relación entre $A_r$ y C%

La predicción y el control del Shot Peening depende de la relación entre  $A_r$  y C%. La ecuación 2 nos da la relación establecida entre cobertura y la relación de área de impacto,

$$C\% = 100[1 - \exp(-A_r)] \quad (2)$$

Donde C% = cobertura

$A_r$  = La relación entre área total de impactos sobre área objetivo.

La cobertura crece en función a  $A_r$ . El ritmo de incremento cae con el incremento de  $A_r$ . La figura 23 muestra la forma exponencial de la ecuación 2. Se han destacado las relaciones  $A_r$  1 y 4. Si, por ejemplo, una pasada (ciclo) supusiera una relación de impacto de 1, predeciríamos una cobertura del 63%. Una relación de impacto de 4, supondría una cobertura de 98%. El 98% de cobertura, se especifica como “cobertura total o completa” en la norma SAE J2277.

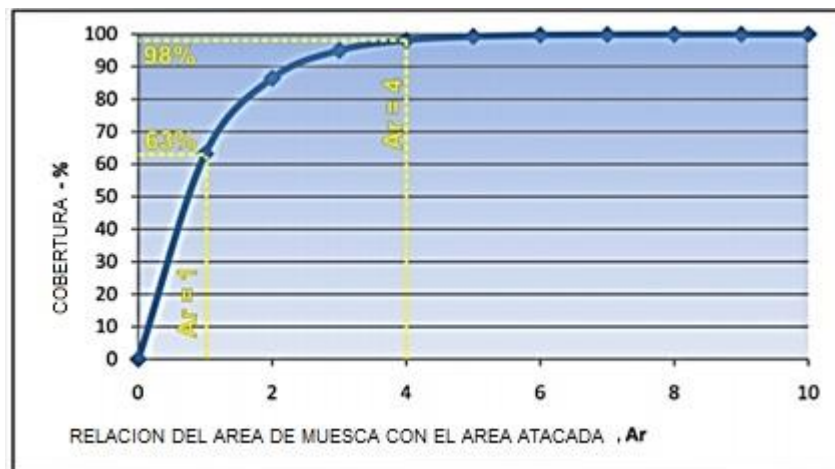


Figura 23. Gráfico de ecuación 2 relación entre C% y  $A_r$ .  
Fuente: RICK, David, Shot Peening Coverage: Prediction and Control, 2012.

La tabla 4 muestra los valores de cobertura de la figura 24 para valores enteros de Ar. Los valores de cobertura se han cuantificado con precisión de 3 decimales, aunque semejante precisión no tiene relevancia práctica. No podemos determinar la cobertura con precisión de 3 decimales. Simplemente se incluyen para destacar que el 100% no se alcanza nunca.

Ar	C%	NO SHOT PEEN - %
1	63.212	36.788
2	86.466	13.534
3	95.021	4.979
4	98.168	1.832
5	99.326	0.674
6	99.752	0.248
7	99.909	0.091
8	99.966	0.034
9	99.988	0.012
10	99.995	0.005

**Tabla 4. Cobertura C% para valores de Ar entero.**  
**Fuente: RICK, David, Shot Peening Coverage: Prediction and Control, 2012.**

Los porcentajes sin impactar (100-C%) se han incluido para explicar por qué nunca se alcanza el 100%. Después de aplicar una pasada con relación Ar igual a 1, queda un 36,788% sin Shot Peening. Una segunda pasada idéntica a la primera, impactará solo un 63% del 36,788% que había quedado sin impactar dejando un 37% de ese 37% (redondeando) que equivale a un 13,5%. Una tercera pasada dejará un 37% del 13,5% sin impactar, que equivaldrá a un 5%. Así, siempre tendremos una porción de material sin impactar, en cualquier caso, será un porcentaje pequeño. (RICK, 2012)

#### 4.3.3. Granalla para Shot Peening

Las esferas que se utilizan para el proceso de Shot Peening son pequeñas esferas que pueden ser:

- Acero colado (tipo utilizado para el proyecto)
- Acero de alambre cortado y redondeado
- Acero aleado o inoxidable cortado y redondeado
- Cerámica
- Vidrio

Los cuales se rigen bajo las siguientes normas establecidas (SAE):

- SAE J441 – CUT WIRE SHOT
- SAE J444 – CAST SHOT AND GRIT SIZE SPECIFICATIONS PEENING AND CLEARING
- SAE J445 – METALLIC SHOT AND GRIT MECHANICAL TESTING
- SAE J827 – HIGH CARBON CAST-STEEL SHOT
- SAE J1173 .- SIZE CLASSIFICATION AND CHARACTERISTICS OF GLASS BEADS FOR PEENING
- SAE J1830 – CERAMIC
- SAE J2175 – SPECIFICATIONS FOR LOW CARBON CAST TEEL SHOT (SAE J2441,2000)

La mayoría de las veces se utiliza esferas de acero colado o de alambre cortado y redondeado. Se utiliza el acero inoxidable para las aplicaciones en las cuales se tiene que evitar contaminar la superficie tratada.

Las esferas de acero cortado son cuidadosamente redondeadas para tener la forma esférica, es cada vez más especificada a causa de la uniformidad de su diámetro, de su estado de forja y de si longevidad. Se dispone de una variedad de durezas y siguiendo una granulometría más apretada que la bola de acero colado.



Las esferas de vidrio se utilizan también en aplicaciones donde se requiere eliminar el riesgo de contaminación de la superficie tratada. Generalmente son más pequeñas y livianas, que los otros tipos de esferas y se puede utilizar para tratar pequeños radios en el fondo de roscas así como para tratar piezas delicadas para las cuales se requiere intensidades de Shot Peening bajas.

#### 4.3.3.1. Efectos de la dureza de las esferas en el Shot Peening

La dureza de las esferas influye significativamente en los efectos deseados por el Shot Peening. La dureza de las esferas debe ser por lo menos equivalente a la dureza de las piezas que se van a tratar, siempre y cuando los resultados de acabado superficial no sean críticos. Para las piezas de acero y de metal sin hierro se utiliza esferas con una dureza de 45 – 52 HRC. Para aceros de alta resistencia y dureza superficial (50 HRC en adelante) se deben utilizar esferas con una dureza de 55 – 62 HRC. (Figura 24)

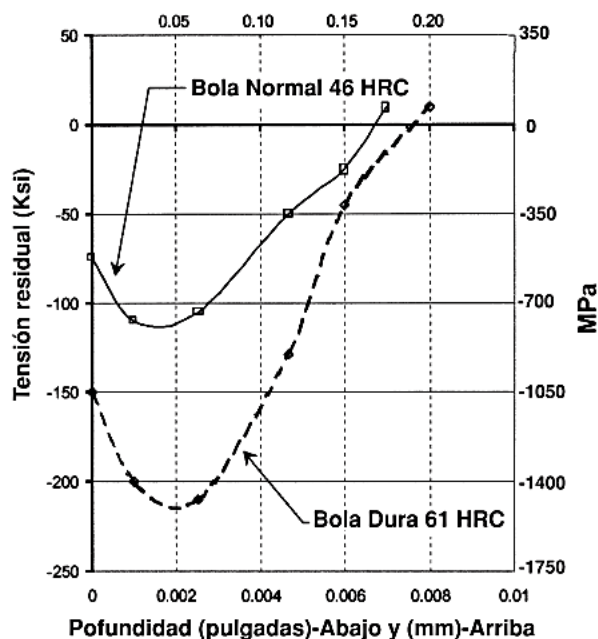


Figura 24. Efecto de la dureza de las esferas en el proceso de Shot Peening. Fuente: METAL IMPROVEMENT COMPANY, 2001.

La distancia entre pico y valle del acabado superficial después de un proceso de Shot Peening es de  $2,9\mu\text{m}$ . (METAL IMPROVEMENT COMPANY, 2001)

#### 4.3.3.2. Control de las esferas de Shot Peening

La esfera debe ser totalmente esférica, la figura 25 muestra los criterios aceptables de huellas en la superficie de una pieza tratada con proceso de Shot Peening (AMS-S-13165, 2007)

##### 1. PERFIL ACEPTABLE



##### 2. PERFIL NO ACEPTABLE, DEFORMADO



##### 3. PERFIL NO ACEPTABLE, ROTO

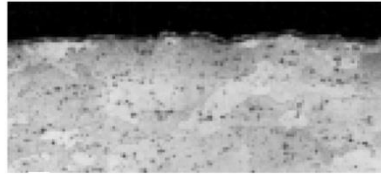


Figura 25. Tipos de huellas aceptables y no aceptables en el proceso de Shot Peening.  
Fuente: (AMS-S-13165, 2007) modificada.

Cuando la esfera se quiebra bajo los impactos de Shot Peening los residuos deben eliminarse para evitar que la superficie tratada sea afectada por la granalla irregular, así provocando creación de grietas y posibles fallas por fatiga prematura. (Figura 26)



*Daño de Superficie  
Creado por Bolas Rotas*



*Estado de Superficie Típico  
con Bolas de Buena Calidad*

**Figura 26. Fotografía ampliada 100x de la superficie tratada con esferas de buena y mala calidad en el proceso de Shot Peening.**

**Fuente: METAL IMPROVEMENT COMPANY, 2001.**

Los diámetros de las esferas deben ser uniformes. La energía del impacto transmitida por las esferas está en función de su masa y de su velocidad. Una esfera más grande tiene una masa mayor y por consiguiente una energía de impacto más significativa. Si se utiliza una mezcla de granalla con diferentes tamaños de esfera, las más grandes crearán zonas de esfuerzos residuales más profundas. La capa de esfuerzos compresivos será heterogénea y ocasionara resultados incoherentes en la resistencia a la fatiga. (Figura 27).



*Bolas de Buena Calidad  
para el Shot Peening*



*Bolas Inaceptables  
de Mala Calidad*

**Figura 27. Calidad de esferas para proceso de Shot Peening.**

**Fuente: METAL IMPROVEMENT COMPANY, 2001.**

En la tabla 5 se pueden observar la equivalencia y tamaño entre los diferentes tipos de granalla según la norma SAE.

<b>Cast Shot TAMAÑO J444</b>	<b>Cut Wire TAMAÑO J441</b>	<b>Glass Bead TAMAÑO SAE J1173</b>	<b>Ceramic Shot TAMAÑO SAE J1830</b>	<b>0,5% MAXIMO (POR PESO) RETENIDO EN US SIEVE, TAMAÑO mm (in)</b>	<b>MAXIMO 20% (POR PESO) PASO EN US SIEVE, TAMAÑO mm (in)</b>
S930	—	GB 280	—	4.00 (0.157)	2.36 (0.0937)
S780	—	GB 235	—	3.35 (0.132)	2.00 (0.0787)
S660	—	GB 200	—	2.80 (0.110)	1.70 (0.0661)
S550	SCW/CW-62	GB 170	—	2.36 (0.0937)	1.40 (0.0555)
S460	SCW/CW-54	GB 140	—	2.00 (0.0787)	1.18 (0.0469)
S390	SCW/CW-47	GB 120	—	1.70 (0.0661)	1.00 (0.0394)
S330	SCW/CW-41	GB 100	Z 850	1.40 (0.0555)	0.850 (0.0331)
—	SCW/CW-35	—	—	1.18 (0.0469)	0.710 (0.0278)
S280	SCW/CW-32	GB 85	—	1.18 (0.0469)	0.710 (0.0278)
S230	SCW/CW-28	GB 70	Z 600	1.00 (0.0394)	0.600 (0.0234)
—	SCW/CW-23	GB 60	—	0.850 (0.0331)	0.500 (0.0197)
S170	SCW/CW-20	GB 50	Z 425	0.710 (0.0278)	0.425 (0.0165)
—	SCW/CW-17	GB 40	—	0.600 (0.0234)	0.355 (0.0139)
S110	SCW/CW-14	GB 35	Z 300	0.500 (0.0197)	0.300 (0.0117)
—	—	GB 30	—	0.425 (0.0165)	0.250 (0.0098)
—	—	GB 25	Z 210	0.355 (0.0139)	0.212 (0.0083)
—	—	GB 20	—	0.300 (0.0117)	0.180 (0.0070)
S70	AWC-12	—	—	0.425 (0.0165)	0.180 (0.0070)
—	—	GB 18	Z 150	0.250 (0.0098)	0.150 (0.0059)
—	—	GB 15	—	0.212 (0.0083)	0.125 (0.0049)
—	—	GB 12	—	0.180 (0.0070)	0.106 (0.0041)
—	—	GB 10	—	0.150 (0.0059)	0.090 (0.0035)
—	—	GB 9	—	0.125 (0.0049)	0.075 (0.0029)
—	—	GB 8	—	0.106 (0.0041)	0.063 (0.0025)
—	—	GB 6	—	0.090 (0.0035)	0.053 (0.0021)

Tabla 5. Equivalencia de tamaño de esferas según normatividad SAE.  
Fuente: Shot Peening, SAE J2441, 2000

Según la SAE Aerospace (AMS) la normatividad que regula los requerimientos generales de las esferas para Shot Peening es la siguiente:

- AMS 2431 – PEENING MEDIA GENERAL REQUIREMENTS.

En donde se hace referencia a las normatividades que rigen los diferentes tipos de esferas para Shot Peening:

- AMS 2431/1 – PEENING MEDIA, CAST STEEL SHOT, REGULAR HARDNESS (45 – 52 HRC)
- AMS 2431/2 – PEENING MEDIA, CAST STEEL SHOT, HIGH HARDNESS (55 – 62 HRC)
- AMS 2431/3 – PEENING MEDIA, CONDITIONED CARBON STEEL CUT WIRE SHOT, REGULAR HARDNESS (45 – 52 HRC)
- AMS 2431/4 – PEENING MEDIA, CONDITIONED STAINLESS STEEL CUT WIRE SHOT
- AMS 2431/5 – PEENING MEDIA, PEENING BALLS
- AMS 2431/6 – PEENING MEDIA, GLASS SHOT
- AMS 2431/7 – PEENING MEDIA, CERAMIC SHOT
- AMS 2431/8 – PEENING MEDIA, CONDITIONED CARBON STEEL CUT WIRE SHOT, HIGH HARDNESS (55 – 62 HRC)

La codificación de cada tipo de esfera para el proceso de Shot Peening según la norma AMS es la siguiente: (tabla 6) (AMS 2431, 2006).

CLASIFICACION DE GRANALLA Y CODIGO DE IDENTIFICACION		
ESPECIFICACION	DESCRIPCION	CODIGO
AMS 2431/1	Cast Steel Shot, Regular Hardness (45 to 52 HRC)	ASR
AMS 2431/2	Cast Steel Shot, High Hardness (55 to 62 HRC)	ASH
AMS 2431/3	Conditioned Carbon Steel Cut Wire Shot, Regular Hardness (45 to 52 HRC)	AWCR
AMS 2431/4	Conditioned Stainless Steel Cut Wire Shot	AWS
AMS 2431/5	Peening Balls	APB
AMS 2431/6	Glass Shot	AGB
AMS 2431/7	Ceramic Shot	AZB
AMS 2431/8	Conditioned Carbon Steel Cut Wire Shot, High Hardness (55 to 62 HRC)	AWCH

Tabla 6. Codificación para cada tipo de esferas según norma AMS.  
Fuente: AMS 2431, 2006

#### 4.3.4. Máquinas y equipos para realización de Shot Peening

Existen diferentes tipos de máquinas para realizar el proceso de shot peening, las cuales tienen como finalidad inducir esfuerzos residuales sobre las superficies tratadas.

Los principales grupos de máquinas se pueden determinar de la siguiente manera:

- Convencionales
  - Neumáticas
  - Turbina centrífuga
  - Vapor
- Laser
- Ultrasonido

En este caso se hará énfasis en las maquinas convencionales.

##### 4.3.4.1. Maquinas convencionales

Las máquinas para shot peening de manera convencional se pueden clasificar principalmente es tres grupos:

- Neumáticas
- Turbina centrífuga
- Vapor

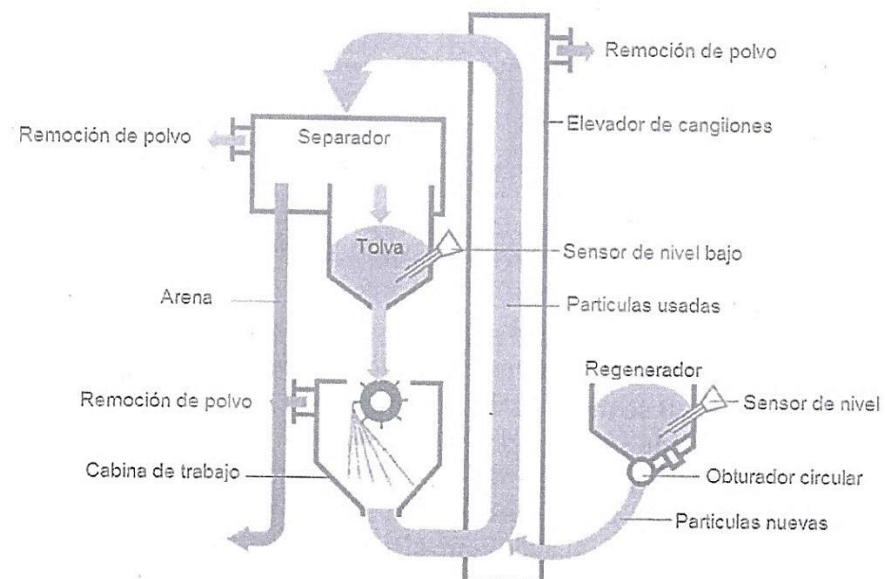
En las máquinas de vapor el principio de funcionamiento es igual a diferencia que estas utilizan un fluido diferente para acelerar el impacto de la granalla. Una máquina de turbina centrífuga se utiliza para grandes producciones, donde se controla más cuidadosamente la velocidad de salida de las partículas, en cambio las maquinas neumáticas y de vapor se utilizan para producciones bajas y con piezas de geometrías complejas. En la tabla 7 se clasifican las diferentes partes que tienen las maquinas convencionales para shot peening y su respectiva función.

Partes	Función
Dispositivo impulsador de tiro	Permite la aceleración y el control de la velocidad del tiro.
Elevador	Sirve para retornar la granalla utilizada, después de ser lanzada por el dispositivo impulsador.
Separador	Se usa para remover la granalla rota y de menor tamaño que no cumple con las especificaciones.
Dispositivo de adición	Utilizado para reemplazar la granalla rota y de menor tamaño.
Banda transportadora de trabajo	Permite la manipulación del ciclo de trabajo de la pieza, ej.: rotativa, movimiento longitudinal, etc.
Cabina contenedora	Se usa para contener la granalla utilizada y también como elemento de seguridad.
Colector de polvo	Sirve para contener y remover el polvo resultante del proceso.

**Tabla 7. Partes de las maquinas convencionales de Shot Peening**  
Fuente: El autor

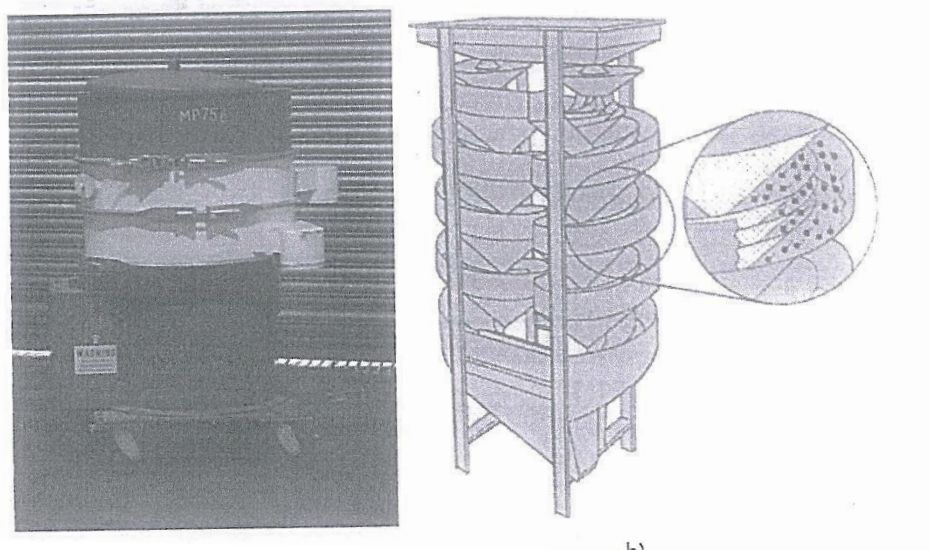
#### 4.3.4.2. Sistemas de recuperación y clasificación de las partículas

La función principal de este sistema es recuperar la granalla utilizada en el proceso de Shot Peening que se hallan en la cabina de trabajo, además de sustituir las partículas que no pueden ser re-utilizadas por partículas nuevas. (Figura 28).



**Figura 28. Esquema general del sistema de recuperación y separación de partículas.**  
Fuente: JARAMILLO, 2013.

Otros sistemas de recuperación de partículas pueden ser por sistema de tamizado-vibración, o usando un separador en espiral. Para eliminar correctamente la granalla demasiadas gruesas o pequeñas, se utiliza un sistema de tamizado dinámico. Se introducen la granalla dentro de un separador con espirales interiores abiertas y exteriores envolventes. El sistema tiene por base la diferencia de velocidad entre la granalla esférica que rueda y la granalla rota que avanzan de golpe. La introducción de la granalla se hace por un tubo a la cumbre del cono. La granalla cae en un depósito de forma cónica, y después en la espiral interior. La granalla esférica tomará suficiente velocidad para expulsarse en la espiral exterior y así podrán ser recicladas. La granalla rota que no puede rodar se quedará en la espiral interior de donde será eliminada. (Figura 29) (METAL IMPROVEMENT COMPANY. INC, 2001).



**Figura 29. Equipo para clasificación de partículas.**  
Fuente: JARAMILLO, 2013.

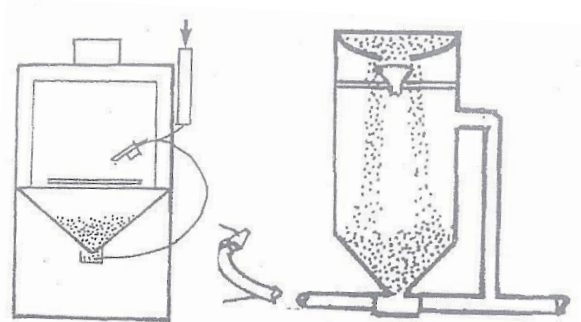


#### 4.3.4.2.1. Máquina neumática

##### 4.3.4.2.1.1. Principio de operación

Su funcionamiento requiere de aire a presión para la circulación de la granalla por la máquina, su principal ventaja es la flexibilidad de manejo de la boquilla para geometrías complicadas.

Para el funcionamiento de estas máquinas de Shot Peening existen tres principios básicos, la primera es por inducción de sifón donde las partículas son aspiradas por la boquilla, el método es sencillo y facilita el manejo del mismo de manera manual en cabinas, permitiendo un trabajo ininterrumpido por largos periodos de tiempo aunque no cuentan con equipos de clasificación y limpieza de partículas. La segunda se conoce como inducción por gravedad, donde las partículas caen por gravedad al paso de aire que se dirige hacia la boquilla, siendo un proceso de recirculación donde se pueden incluir elementos de limpieza y clasificación de partículas. (Figura 30).

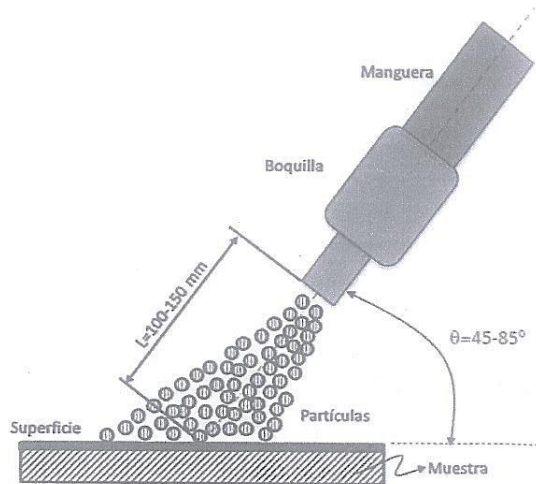


**Figura 30. Sistema de funcionamiento de máquinas neumáticas de sifón (izquierda) y por gravedad (derecha).**

**Fuente: JARAMILLO, 2013.**

El tercer sistema o método directo es el más utilizado, las partículas se suministran con aire a presión desde un recipiente que dirige la corriente de partículas a la boquilla. Una válvula de regulación se encarga del volumen de las partículas en la corriente de aire. Este método ofrece la ventaja de poder utilizar casi cualquier tipo de partícula para el trabajo, y la presión dentro del recipiente es fácil de ajustar. Una de las desventajas de este sistema es la

poca precisión de la válvula de regulación en la alimentación de las partículas en la corriente de aire. Los parámetros de funcionamiento de una maquina neumática van relacionados con el ángulo de la boquilla con respecto a la superficie a tratar y la distancia que separa la salida de la boquilla con la superficie. Variables como el flujo másico es controlado por el método de admisión de aire y de partículas del equipo. (Figura 31).



**Figura 31. Parámetros de boquilla efectuados en el proceso de Shot Peening con maquina neumática.**  
**Fuente: JARAMILLO, 2013.**

#### 4.3.4.3. Boquillas

Las boquillas son las encargadas de dirigir la mezcla de aire y partículas hacia la pieza de trabajo. Existen dos tipos, de orificio recto y de efecto Venturi. Ambas son de forma cónica y la mezcla de aire y partículas entra por el orificio más grande, la salida cónica controla la expansión del aire y acelera las partículas. Para mayores aceleraciones, el orificio de salida debe ser de 1 a 3 veces más pequeño que el de entrada. La boquilla tipo Venturi brinda mejores resultados que el de orificio recto, debido que deja una mayor uniformidad de la intensidad a través del paso del chorro. (Figura 32).

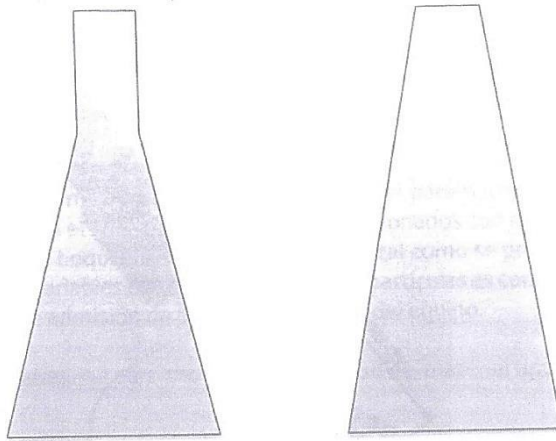


Figura 32. Tipo de boquillas para Shot Peening. De agujero recto (izquierda) y tipo Venturi (derecha).

Fuente: JARAMILLO, 2013.

#### 4.4. MATERIALES DE HERRAMIENTAS UTILIZADAS EN LOS MOTORES DE PERFORACIÓN PETROLERA.

La fabricación de substitutos, Drill Collar y demás herramientas utilizadas en el motor de perforación petrolera se realiza bajo la norma API 7-1 (Specification for Rotary Drill Stem Elements), en donde se establece una clasificación de materiales según sus requerimientos en propiedades mecánicas.

##### 4.4.1. Clasificación de materiales según norma API 7-1

Según la norma API 7-1 se establecen dos tipos de materiales para la fabricación de substitutos de los motores de perforación petrolera, los cuales son:

##### 4.4.1.1. Aceros al carbón

Los aceros al carbón son principalmente los que están compuesta por aleaciones de Hierro (98%), carbono (>2%) y otros elementos que le dan las características especiales al acero como: silicio y magnesio. También existen impurezas en el acero tales como azufre, fosforo, oxigeno e hidrogeno. En la

siguiente tabla se describe los requerimientos de materiales según norma API 7-1.

1	2	3	4	5
RANGO DE O.D. EN DRILL COLLAR	LIMITE ELASTICO	RESISTENCIA A LA TRACCION	ELONGACIÓN, CON LONGITUD DE REFERENCIA 4 VECES EL DIAMETRO	DUREZA BRINELL
in	psi min.	psi min.	% min.	HBW min.
3 1/8 HASTA 6 7/8	110 000	140 000	13	285
7 HASTA 11	100 000	135 000	13	285

**Tabla 8. Propiedades mecánicas y de prueba para materiales de Drill Collar estándar.**  
Fuente: API 7-1, 2006. (Modificado)

La norma API 7-1 no cita exactamente que material se debe usar en la fabricación de substitutos, así que a nivel nacional los más utilizados son los siguientes:

- AISI 4145H

El acero 4145H es una aleación modificada de cromo-molibdeno de alta calidad, es un acero con alto grado de limite elástico. Este acero es suministrado principalmente con tratamientos de temple y endurecimiento con una dureza de 30-36 HRc. Posee un contenido de carbón ligeramente más alto que el acero AISI 4140 el cual lo hace un acero más dúctil y resistente al desgaste.

Principales aplicaciones: Herramientas de perforación petrolera, Drill Collars, Stabilizer, Drill Pipe, Rotary subs, entre otros.

Composición química: Carbono (C): 0,47%, Silicio (Si): 0,25%, Manganeso (Mn): 1,1%, Fosforo (P): máx. 0,035%, Azufre (S): Max 0,04%, Cromo (Cr): 0,95%, Níquel (Ni): máx. 0,25%, Molibdeno (Mo): 0,2%.

Propiedades mecánicas (Diámetro exterior 6,5"): Esfuerzo a la tracción: 150KSI, límite elástico: 120KSI, Porcentaje de elongación: 15%, Dureza Brinell: 285-341HB. (BOHLER UDDEHOLM)

#### 4.4.1.2. Acero inoxidable

Los Aceros Inoxidables son una gama de aleaciones que contienen un mínimo de 11% de Cromo. El Cromo forma en la superficie del acero una película pasiva, extremadamente delgada, continua y estable. Esta película deja la superficie inerte a las reacciones químicas. Esta es la característica principal de resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables. La siguiente tabla muestra las propiedades mecánicas que debe cumplir un acero no magnético inoxidable según la norma API 7-1.

RANGO DE OD EN DRILL COLLARS  in	ACERO INOXIDABLE			ALEACION COBRE BERILIO		
	LIMITE ELASTICO  psi min.	RESISTENCIA A LA TRACCION  psi min.	ELONGACION  % min.	LIMITE ELASTICO  psi min.	RESISTENCIA A LA TRACCION  psi min.	ELONGACION  % min.
3 1/2 HASTA 6 7/8	110 000	120 000	18	110 000	140 000	12
7 HASTA 11	100 000	110 000	20	100 000	135 000	13

**Tabla 9. Propiedades mecánicas y de prueba para Drill Collar en material no magnético.**  
Fuente: API 7-1, 2006. (Modificado).

El material que cumple con el requerimiento de API 7-1 y se utiliza en la mayoría de las fabricaciones a nivel nacional es el siguiente:

- No magnetic Drill Collar P530

La aleación P530, comúnmente referenciada como NMDC P530, es una aleación de níquel-cobre con resistencia a la corrosión similar a la de la aleación 400, pero con mayor fuerza. Aplicaciones industriales típicas de aleación P530 incluye sujetadores, resortes y cadenas para los componentes marinos de servicio, bombas y válvulas para instalaciones de procesamiento químico, así como palas y raspadores utilizados en la producción de celulosa y papel. Para la industria petrolera y la producción de gas utilizan aleación P530

para Drill Collars, Substitutos, pump shaft, impellers y valves como así como para sensores y componentes electrónicos.

Composición química: Carbono (C): 0,05%, Silicio (Si): 0,45%, Manganeso (Mn): 19,91%, Azufre (S): 0,001%, Níquel (Ni): 1,18%, Molibdeno (Mo): 0,44%. Fosforo (P): 0,022%, Nitrógeno (N): 0,29%

Propiedades mecánicas (Hot-finished/Aged): Esfuerzo a la tracción: 130,4KSI, limite elástico: 119,6KSI, Porcentaje de elongación: 38%, Dureza Brinell: 288 - 291BHN. (SCHOELLER BLECKMANN SALES CO, INC)

El NMDC P530 va ser utilizado para el proceso de Shot Peening en conexiones rotarias de hombro desarrollado en el presente trabajo.

#### 4.5. CONEXIONES ROTARIAS DE HOMBRO (API 7-2)

Es un tipo de conexión que se utiliza principalmente para unir las diferentes secciones que comprenden una sarta de perforación petrolera. Sus características principales son (Figura 33):

- Son conexiones cónicas (tapered).
- Posee un hombro de sello (Shoulder).

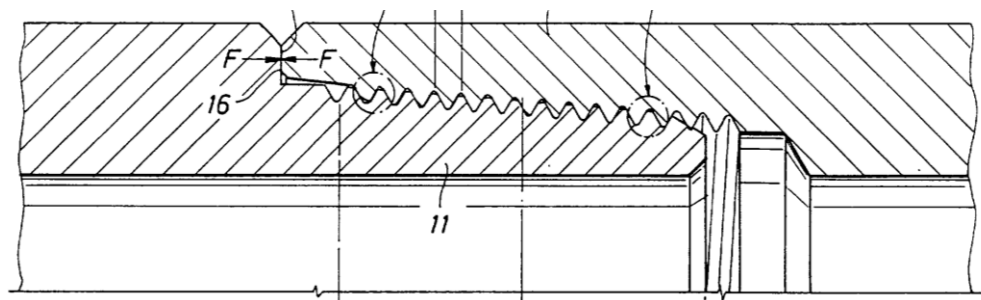


Figura 33. Unión entre conexión PIN (izquierda) y conexión BOX (derecha) para herramientas de perforación petrolera.

Fuente: API 7-2 - Specification for Threading and Gauging of Rotary Shouldered Thread Connections 2008.

Existen características adicionales que determinan la conexión rotaria de hombro, como son:

- Paso (Lead)
- Forma de conexión (thread form)
- Longitud (length)
- Diámetro mayor y menor.

Los tamaños de las conexiones rotarias de hombro pueden ser diferentes, desde 1" REG. hasta 8 5/8" REG. – NC23 hasta NC77 y 5 1/2" FH hasta 6 5/8" FH, entre otros.

Este tipo de conexiones están regidas bajo la norma API 7-2 (Specification for Threading and Gauging of Rotary Shouldered Thread Connections), la cual establece las dimensiones para su fabricación, los parámetros de inspección en las conexiones y los diferentes tipos, tamaños y formas.

Los principales daños que sufren estas conexiones son causados por el torque y las cargas de tensión y compresión a las cuales están sometidas las sargas de perforación.

Los diferentes tipos de daños que sufren estas conexiones están descritos en el título 4.5. de este proyecto. (Efecto benéfico del Shot Peening en los principales daños de herramientas de motores de perforación petrolera).

## 5. CONDICIONES ESTABLECIDAS DE SHOT PEENING

### 5.1. SELECCIÓN DE CONEXIÓN API 7-2.

El Shot Peening para conexiones rotarias de hombro se va a realizar sobre una conexión NC 50 API 7-2 PIN, fabricada en un material NMDC P530. (Figura 34).

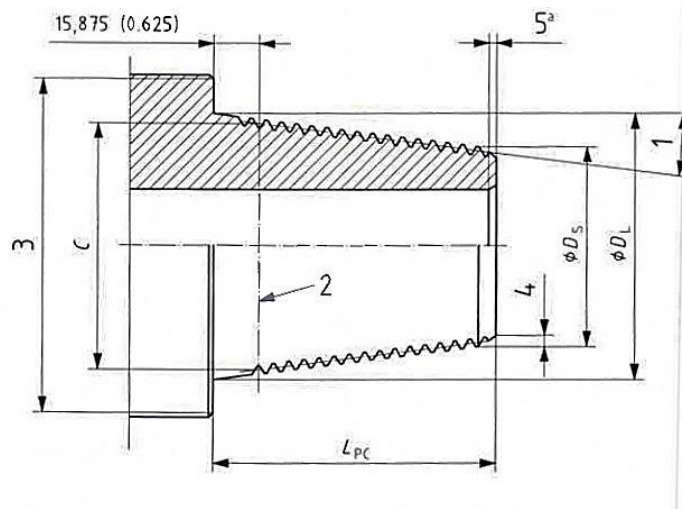


Figura 34. Dibujo de conexión rotaria de hombro (PIN).

Fuente: API 7-2 - Specification for Threading and Gauging of Rotary Shouldered Thread Connections 2008.

En la siguiente tabla se observa las dimensiones de la conexión anteriormente mostrada.

NUMERO DE CONEXION O TAMAÑO	FORMA DE HILO	HILOS POR CADA 25,4mm	CONICIDAD mm/m EN DIAMETRO	DIAMETRO PITCH, ENTRE EL HILO Y EL PUNTO GAUGE	DIAMETRO MAYOR DEL PIN	DIAMETRO DE LA CARA PLANA DEL PIN $\pm 0,4$ DLF	DIAMETRO MENOR DEL PIN	LONGITUD DEL PIN $+0 -3,18$ LPC
				C	DL		DS	
NC 50	V-0.038R	4	166.67	128.0592	133.35	130.43	114.30	114.30

Tabla 10. Dimensiones de la conexión NC 50 PIN (mm).

Fuente: API 7-2 - Specification for Threading and Gauging of Rotary Shouldered Thread Connections 2008 (modificado).



El procedimiento para la realización del Shot Peening es basada en la norma SAE J2441 – Shot Peening (2000) y AMS-S-13165 – Shot Peening of metals parts (2007).

## 5.2. PARÁMETROS DEL PROCESO

Las partes deberán estar libres de grasa, suciedad, aceite, corrosión y recubrimientos anticorrosivos preventivos tales como recubrimientos anódicos, metalizado y pintura, la limpieza de herramientas se realiza por medio de desengrasantes y varsol, también por medio de herramientas manuales como motor tools y pulidoras. Las áreas de la pieza de trabajo, que no se designan para realizar shot peening, deben estar enmascaradas con cinta protectora u otro material que proteja su superficie. (SAE J2241, 2000)

Para el acero NMDC P530 se establece una intensidad de Shot Peening desde 0,014A hasta 0,018A para espesores mayores a 9,52mm. Ya que la mayoría de las conexiones NC50 se trabajan con un diámetro interior de 71,4mm, y el espesor del material de la sección más pequeña de la conexión NC50 mediría aproximadamente 43mm.

Los parámetros establecidos para obtener la intensidad de Shot Peening son:

- Tipo de granalla: Cast Steel Shot S170 (SAE J444).
- Diámetro de granalla: 0,71mm de diámetro.
- Dureza de granalla: 40-51 HRC
- Angulo de incidencia: 90°
- Presión de aire: 50 PSI.
- Distancia entre boquilla y pieza: 50mm a 100mm
- Diámetro de salida de boquilla: 8mm

### 5.3. MAQUINAS Y EQUIPOS

Se utilizara compresor PUMA TR5080VM para el suministro de aire comprimido con los siguientes parámetros (Figura 35):



- Potencia: 5 HP.
- Etapas: 2.
- Presión: 175 PSI.
- Capacidad: 21,3 CFM.

**Figura 35. Compresor PUMA.**  
Fuente: El autor.

La Cabina de granallado es una ECONOLINE como es muestra en la siguiente figura (figura 36):



**Figura 36. Cabina de granallado ECONOLINE.**  
Fuente: El autor.

Para el control del proceso de Shot Peening, se utiliza un sistema de rodillos de giro impulsados por un motor eléctrico como se muestra en la siguiente figura (Figura 37).



**Figura 37. Sistema de rodillos giratorios.**  
Fuente: El autor

## 6. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### 6.1. CURVA DE SATURACIÓN

El proceso de Shot Peening inicia en la obtención de la curva de saturación, la cual se realiza según la norma SAE J443 - Procedures for Using Standard Shot Peening Test Strip y con los elementos nombrados en la norma SAE J442 - Test Strips, Holding Block and Gauge for Shot Peening.

Inicialmente se compran las tiras de prueba Almen tipo A-2™, el accesorio de sujeción Almen y los marcadores para verificación de la cobertura 220-2 en Electronics Inc (figura 38). Infortunadamente no se compra el Almen Gauge Jr. ya que en ese entonces empezó la crisis petrolera y con el aumento del dólar los costos de importación eran muy altos, en cambio se decidió hacer las mediciones correspondientes por medio de la mesa longitudinal de una fresadora NC y un comparador de caratulas digital con una resolución de 0,0005" (figura 39). La granalla S170 se obtiene por medio de compra local en Blasting Experts.

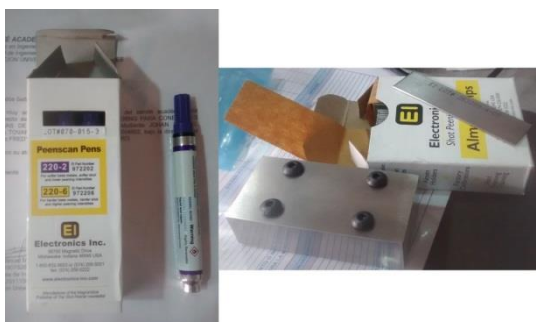


Figura 38. . Peenscan Pens, accesorio y tiras de prueba Almen.  
Fuente: El autor



Figura 39. Fresadora NC y comparador de caratulas utilizados para medición de intensidad Almen.  
Fuente: El autor

### 6.1.1. Shot Peening sobre tiras de prueba Almen

La primera prueba de Shot Peening es una prueba piloto, se realiza sobre las tiras de prueba Almen sujetadas en el accesorio Almen, se gradúa la presión del compresor Puma a 50PSI y se hacen 6 tomas de datos de la siguiente forma:

- Se coloca el accesorio Almen con la respectiva tira dentro de la cabina de granallado Econoline, manualmente se sostiene la boquilla de salida totalmente perpendicular al accesorio Almen a 50mm de distancia por encima de uno de sus extremos, se procede a accionar el sistema de aire comprimido que dispara la granalla esférica mientras se desplaza constantemente la boquilla de salida totalmente perpendicular a lo largo de la tira de prueba Almen por unos 10s donde se realiza una pasada completa de lado a lado de la tira Almen, se extrae la tira de prueba Almen del accesorio y se procede a escribir el tiempo de granallado y la presión registrada en el manómetro del regulador (figura 40).
- Para las siguientes tomas de datos se realiza el mismo método pero aumentando el tiempo de granallado al doble con respecto al punto anterior, es decir que se aumenta a 20s, 40s, 80s, 160s, 320s.



**Figura 40. Realización de Shot Peening sobre tiras de prueba Almen.**  
Fuente: El autor

Se observa en el proceso experimental que la presión de 50PSI empieza a bajar a medida que se realiza Shot Peening con tiempos de exposición más largos, ya que mientras se reemplaza la tira de prueba Almen usada por una nueva, el compresor alcanza a cargar su capacidad de aire comprimido parcialmente y no repone totalmente su capacidad utilizada, esto genera que al empezar una prueba con el tiempo de exposición al doble, la presión sea menor a 50PSI. La presión varía para este primer proceso experimental entre 50 – 43PSI siendo mayor al 10% de tolerancia permisible con respecto al valor nominal según la norma AMS 2431, 2006, así que se presume que la prueba piloto de Shot Peening va arrojar datos inapropiados para la creación de la curva de saturación, se deberá realizar la prueba nuevamente con una presión menor y calibrar el compresor para que se pueda controlar la nueva presión.

#### 6.1.2. Medición de altura de arco en tiras de prueba Almen

El siguiente paso consiste en medir la altura de la curva en la tira prueba de prueba por medio de la mesa longitudinal de la fresadora NC de la siguiente forma:

- Se sujeta el accesorio de tira Almen a la mesa longitudinal por medio de bridas de sujeción.
- Se posiciona el comparador de caratulas en el mandril de la fresadora NC verificando perpendicularidad con respecto a la mesa longitudinal.
- Se posiciona una tira Almen nueva dentro de los tornillos de sujeción en el accesorio Almen sueltos.
- Se coloca un tope delantero y un tope trasero en el accesorio de sujeción Almen inmovilizando la tira de prueba Almen.
- Se desplaza la mesa longitudinal en la posición correcta donde el accesorio de sujeción Almen quede exactamente debajo del comparador de caratulas sujetado al mandril de la fresadora.

- Se eleva la mesa longitudinal para patronar el punto cero del comparador de caratulas y se desplaza a lo largo de la tira Almen para comprobar el cero en toda su longitud.
- Una vez comprobado el punto cero se coloca la tira de prueba Almen tratada con Shot Peening a 10s, se mueve la mesa longitudinal para que el comparador de caratula recorra la longitud ida y vuelta de la tira de prueba Almen puesta en el sujetador Almen. Va llegar al punto en el que la medida aumente hasta el máximo de su magnitud y empiece a disminuir hasta cero, esa magnitud máxima será la altura del arco en la tira de prueba Almen.
- Se repite este proceso para las tiras de prueba con 20s, 40s, 80s, 160s, 320s.
- Finalizada la primera toma de datos, se coloca nuevamente una tira de prueba Almen nueva y se comprueba el punto cero del comparador de caratulas (figura 41).
- Una vez se realice este proceso se toman otras dos veces la medida de la altura del arco en la tira de prueba y así completar tres medidas, luego poder determinar el número de réplicas necesarias para determinar la confiabilidad del proceso.



**Figura 41. Medición de altura en tiras de prueba Almen.**  
Fuente: El autor

### 6.1.3. Elaboración de la curva de saturación.

Con los datos obtenidos se realiza un promedio para cada uno de los tiempos de exposición de Shot Peening. Luego con el Solucionador para la curva de saturación SATURATION CURVE SOLVER, PROGRAM SCS3 suministrado por Electronics Inc. se crea la curva de saturación de la siguiente forma:

- Se abre el Solucionador de curva de saturación SCS3 seleccionado para crear la curva de saturación con 6 puntos según SATURATION CURVE SOLVER, Manual de usuario (figura 42).
- Ingresar los valores de tiempo y altura de arco en las casillas azules borrando los valores de ejemplo. La altura se debe colocar en milésimas de pulgada y el tiempo en segundos.
- Ingresar el valor más grande de la altura de arco de las tiras de prueba en la casilla a y el promedio del tiempo de los primeros cuatro puntos en la casilla T.
- La casilla H17 que corresponde a SUM se debe ejecutar el Solver del Excel.
- Luego en la casilla J11 se ejecuta la opción: "Análisis y sí". Después hacer clic en el botón "buscar objetivo", luego hacer clic en la opción: "con valor de" y escribir el número 0 y después hacer clic en "para cambiar la celda" y seleccionar la celda J10 y por ultimo hacer clic en aceptar

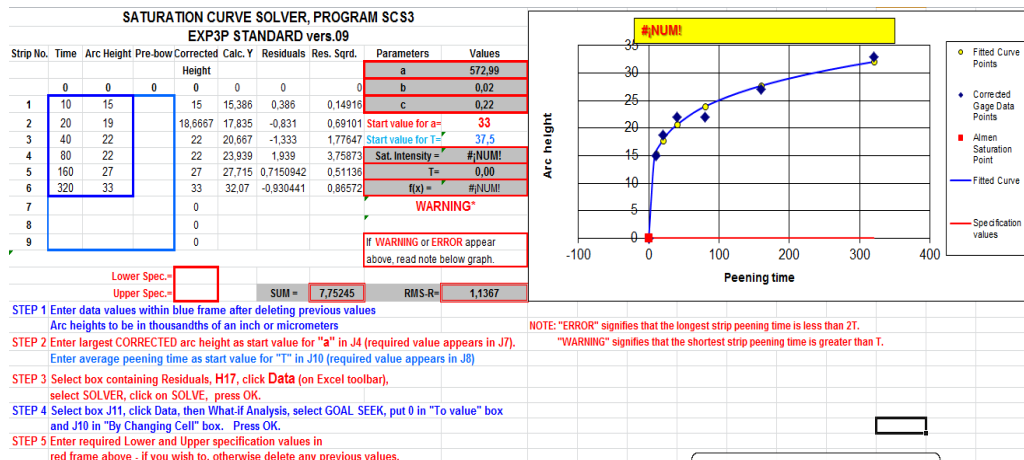


Figura 42. Solucionador para curva de saturación.  
Fuente: El autor.



## 6.2. PRUEBA PILOTO DE SHOT PEENING.

### 6.2.1. Parámetros establecidos:

A continuación se muestran los parámetros pre-establecidos con los cuales se realizó la prueba piloto de Shot Peening sobre las tiras de prueba Almen. (Tabla 11).

UNIDAD	MAGNITUD
INTENSIDAD	0,014 - 0,018 A
COBERTURA	COMPLETA (100%)
TIPO DE GRANALLA	CAST STEEL SHOT S170
DUREZA DE GRANALLA	40 - 51 HRC
ANGULO DE INCIDENCIA	90°
PRESIÓN DE AIRE	50 PSI
DISTANCIA ENTRE BOQUILLA Y PIEZA	50mm - 100mm
DIÁMETRO DE SALIDA DE BOQUILLA	8mm

**Tabla 6. Parámetros de prueba piloto de Shot Peening.**  
Fuente: El autor.

### 6.2.2. Altura de curvatura en tiras de prueba Almen.

Una vez realizado el proceso de Shot Peening sobre las tiras de prueba Almen se procede a medir las alturas de la curvatura en cada tira Almen obteniendo los siguientes resultados: (tabla 12).

TIRA ALMEN No.	TIEMPO (s)	ALTURA 1 (in)	ALTURA 2 (in)	ALTURA 3 (in)	ALTURA PROMEDIO (in)	PRESIÓN (PSI)
1	10	0,016	0,014	0,015	0,015	45
2	20	0,019	0,019	0,017	0,018	43
3	40	0,022	0,022	0,022	0,022	48
4	80	0,022	0,022	0,022	0,022	50
5	160	0,026	0,027	0,028	0,027	48
6	320	0,033	0,033	0,033	0,033	50

**Tabla 7. Altura de curvatura en tiras de prueba Almen de prueba piloto de Shot Peening.**  
Fuente: El autor.

### 6.2.3. Solucionador de curva de saturación:

La altura promedio de cada una de las tiras de prueba Almen es ingresada al solucionador de curva de saturación siguiendo las instrucciones descritas anteriormente: (tabla 13)

PROGRAMA SOLUCIONADOR DE CURVA DE SATURACIÓN SCS3									
EXP3P STANDARD vers.09									
Tira No.	Tiempo	Altura arco	Pre-bow	Corrección	Calculo.	Residuals	Res. Sqrd.	Parámetros	Valores
				Altura	Y			a	572,99
	0	0	0	0	0	0	0	b	0,02
1	10	15		15	15,386	0,386	0,14916	c	0,22
2	20	18		18,6667	17,835	-0,831	0,69101	Valor inicial para a=	33
3	40	22		22	20,667	-1,333	1,77647	Valor inicial para T=	37,5
4	80	22		22	23,939	1,939	3,75873	Intensidad =	#iNUM!
5	160	27		27	27,715	0,7150942	0,51136	T=	0,00
6	320	33		33	32,07	-0,930441	0,86572	f(x) =	#iNUM!
7				0				ADVERTENCIA*	
8				0					
9				0				Si aparece ADVERTENCIA o ERROR sobre estas celdas leer	
								Las notas junto a la gráfica.	
Lower Spec.=				0,014					
Upper Spec.=				0,018		SUM =	7,75245	RMS-R=	1,1367

Tabla 13. Resultados de solucionador de curva de saturación SCS3 de prueba piloto de Shot Peening.  
Fuente: El autor.

### 6.2.4. Curva de saturación:

Una vez ejecutado el Solver en el solucionador de curva de saturación se obtiene la gráfica de altura de curvatura vs tiempo de exposición para la prueba piloto. (Figura 43)

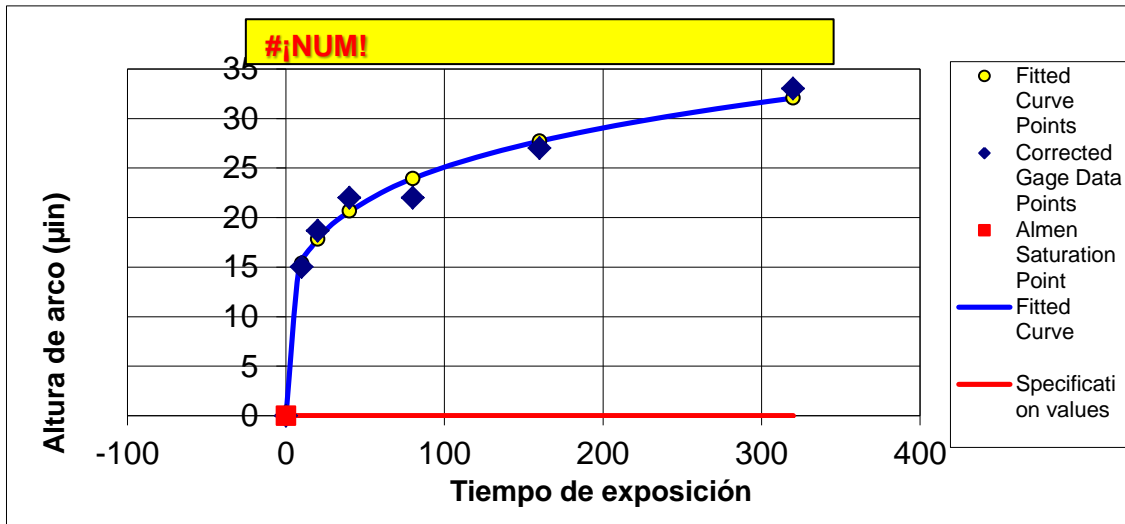


Figura 43. Curva de saturación de primer prueba de Shot Peening.  
Fuente: El autor.

Una vez obtenida la curva de saturación con los datos suministrados aparece una advertencia la cual indica: “**El menor tiempo de granallado es mayor al tiempo T de saturación**” esto quiere decir que no se puede obtener el punto de intensidad Almen con los datos suministrados. Entonces hay que iniciar nuevamente el proceso experimental.

### 6.3. NUMERO DE REPLICAS

Con el fin de determinar la confiabilidad y la repetitividad adecuada para obtener la curva de saturación se utiliza el método estadístico; número de réplicas, Que consiste en obtener el número de veces (n) que se requiere hacer una toma de datos basándose en una prueba piloto bajo parámetros iguales según la siguiente ecuación: (WALPOLE, 1999)

$$n = \frac{\sigma^2 t^2}{\bar{x}^2 a^2} \quad (3)$$

Dónde:  $\sigma^2$  es la varianza de la muestra

$t$  es el estadístico de la distribución t student.

$\bar{x}$  es el promedio de la muestra

$a$  es la probabilidad de error permitida

Para un factor de confiabilidad del 90% ( $\alpha=0,10$ ) se obtienen los datos necesarios como varianzas, promedio y T student para así usar la ecuación (3) y determinar el número de réplicas para cada periodo de exposición del proceso de Shot Peening de la siguiente forma: (Tabla 14)

TIRA ALMEN No.	TIEMPO (s)	ALTURA 1 (in)	ALTURA 2 (in)	ALTURA 3 (in)	VARIANZA	ALTURA PROMEDIO (in)	t STUDENT	ERROR PERMITIDO	NUMERO DE REPLICAS
1	10	0,016	0,014	0,015	1,00E-06	0,015	2,92	0,1	3,79E+00
2	20	0,019	0,019	0,017	1,33E-06	0,018	2,92	0,1	3,51E+00
3	40	0,022	0,022	0,022	1,81E-35	0,022	2,92	0,1	3,18E-29
4	80	0,022	0,022	0,022	1,81E-35	0,022	2,92	0,1	3,18E-29
5	160	0,026	0,027	0,028	1,00E-06	0,027	2,92	0,1	1,17E+00
6	320	0,033	0,033	0,033	0,00E+00	0,033	2,92	0,1	0,00E+00

**Tabla 14. Numero de réplicas para prueba de Shot Peening.**  
Fuente: El autor

Teniendo el resultado del número de réplicas más alto correspondiente a 3,79 se determina realizar la segunda prueba de Shot Peening con 4 tiras de prueba Almen para cada tiempo de exposición y así cumplir con las 4 repeticiones según el número de réplicas.

#### 6.4. PRUEBA DE SHOT PEENING

La segunda prueba de Shot Peening es la prueba real, se realiza tomando 4 puntos para la generación de la curva de saturación (10s, 20s, 40s, 80s) y se reduce la presión del compresor a 30PSI, ya que es la presión nominal de trabajo del compresor PUMA y no presenta variación en tiempos prolongados de trabajo, adicionalmente se realiza la medición en 4 grupos muestrales para total de 16 tomas de datos según el resultado del número de réplicas confiables para la prueba.

Se realiza nuevamente el proceso de Shot Peening como se describió anteriormente en el título 6.1.1. Shot Peening sobre tiras de prueba Almen, esta no evidencia una variación de la presión entre los diferentes periodos de

tiempo. Todas las tiras Almen a las cuales se les realiza Shot Peening mantienen una presión constante de 30PSI.

Después de haber realizado Shot Peening y haber obtenido los 16 datos, se procede a medir la altura del arco en cada una de las tiras Almen como se describió en el título 6.1.2. Medición de altura de arco en tiras de prueba Almen. Igualmente se toman tres veces medida por cada tira Almen, para realizar un promedio para cada tira a su vez de las 16 tiras Almen se promedian los valores correspondientes a cada tiempo de exposición de Shot Peening y se realiza una desviación estándar para demostrar el porcentaje de confiabilidad.

Luego de obtener los datos se procede a generar la curva de saturación según el título 6.1.3. Elaboración de la curva de saturación, con el SATURATION CURVE SOLVER SCS1 suministrado igualmente por Electronics Inc, a diferencia del anterior solucionador, el SCS1 se utiliza para curvas de saturación generadas de 4 puntos de datos. En este caso la curva de saturación es la correcta y se determina la intensidad Almen para la prueba de Shot Peening.

#### 6.5. PRUEBA DE INTENSIDAD ALMEN EN PROCESO PRODUCTIVO

Una vez obtenida la intensidad Almen se procede hacer una prueba en el proceso productivo del Shot Peening sobre una conexión rotaria de hombro de la siguiente forma (según descripción de norma SAE J443 - Procedures for Using Standard Shot Peening Test Strip):

- Se coloca una tira de prueba Almen nueva en accesorio sujetador Almen.
- Se adhiere el accesorio de sujeción Almen a la conexión rotaria de hombro NC 50 API 7-2 PIN de un Cross Over por medio de cinta industrial (plateada).

- Luego se pone el Cross Over sobre los rodillos giratorios dejando en un extremo sobresaliendo la conexión NC 50 PIN.
- Se ingresa la conexión dentro de la cabina de granallado Econoline y se restringe el movimiento de las ruedas de los rodillos giratorios.
- Se ajustan los parámetros con los cuales se hicieron las pruebas de Shot Peening para obtener la curva de saturación.
- Se procede a encender los rodillos giratorios y el sistema de aire comprimido para realizar Shot Peening sobre el accesorio de sujeción Almen colocado en la conexión en movimiento.
- Una vez cumplido el tiempo de exposición de Shot Peening correspondiente al punto de intensidad Almen, se retira la tira de prueba Almen y el accesorio de sujeción Almen del Cross Over y se procede a medir la altura del arco de la tira Almen por medio de la mesa longitudinal de la fresadora NC.
- Se corrobora que la intensidad Almen está dentro del rango de Intensidad establecida en los parámetros iniciales y se da por terminada la prueba de intensidad Almen para procesos productivos (figura 44).



**Figura 44. Prueba de intensidad Almen en NC50 API PIN.**  
Fuente: El autor.

## 6.6. COBERTURA COMPLETA EN PROCESO DE SHOT PEENING

Una vez obtenida la intensidad Almen para el proceso Shot Peening en la conexión NC 50 API 7-2 PIN se procede a realizar el proceso de cobertura de Shot Peening como lo describe la norma SAE J2277 por medio de los marcadores de cobertura PEENSCAN PENS 220-2:

- Primero se limpia muy bien la conexión NC 50 API 7-2 PIN con varsol, desengrasante o cualquier otro limpiador químico junto con un trapo o estopa verificando que la superficie de la conexión quede libre de impurezas, residuos de grasa y demás suciedad.
- Se cubre las zonas que no se va a realizar Shot Peening como lo es el sello de la conexión rotaria de hombro y el Bisel por medio de cinta de enmascarar o cualquier otra cinta pegante.
- Se agita muy bien el marcador PEENSCAN PENS 220-2 y se aplica una línea de forma longitudinal sobre la conexión NC50 PIN que cubra la cresta, los flancos y el valle del hilo de la conexión rotaria de hombro.
- Se gira la herramienta 90° y se hace una nueva línea igual a la primera y así hasta completar 4 líneas equidistantes a 90° una de la otra.
- Se revisa bajo luz ultravioleta que las líneas hayan quedado continuas y no se encuentre ninguna discontinuidad extraña.
- Se ingresa la conexión NC 50 PIN a la cabina de granallado y se procede a realizar Shot Peening según los parámetros establecidos en la curva de saturación y la intensidad Almen de la prueba productiva.
- Una vez realizado el Shot Peening sobre toda la conexión NC 50 PIN se procede a revisar el grado de remoción del marcador aplicado anteriormente bajo luz ultravioleta.
- En este caso se observan pequeñas trazas fluorescentes de marcador que están todavía en la conexión rotaria, así que se realiza Shot Peening nuevamente hasta remover completamente las trazas de marcador fluorescente PEENSCAN PENS 220-2 como lo indica la norma SAE J2277. Una vez removido el marcador en su totalidad se dice que el

proceso de Shot Peening tiene una cobertura completa y se da por terminado el proceso (figura 45).

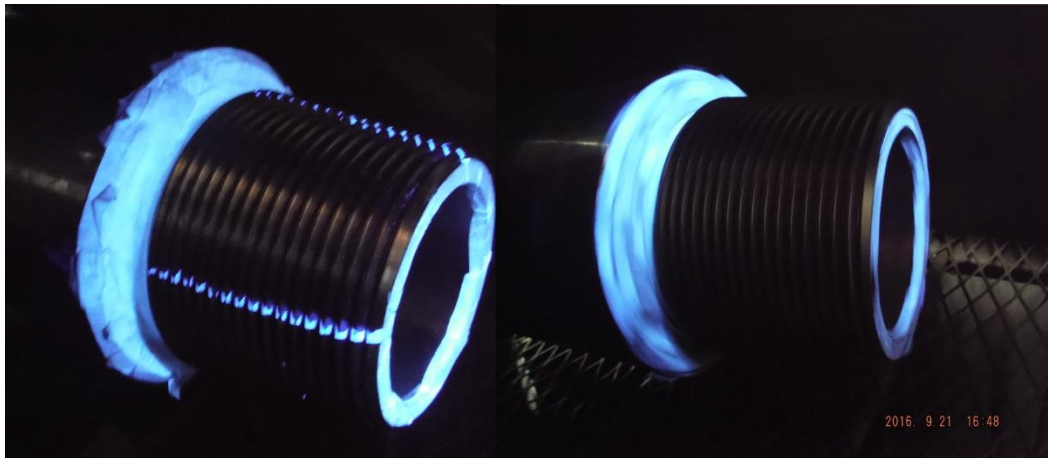


Figura 45. Control calidad de cobertura en la conexión NC50 API PIN, antes (izquierda) y después (derecha) de proceso de Shot Peening.  
Fuente: El autor.

## 6.7. AUMENTO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA

Para determinar el aumento de la resistencia a la fatiga del proceso de Shot Peening en conexiones rotarias de hombro API 7-2 se procede a mecanizar 9 probetas de ensayos a fatiga según la figura 46.

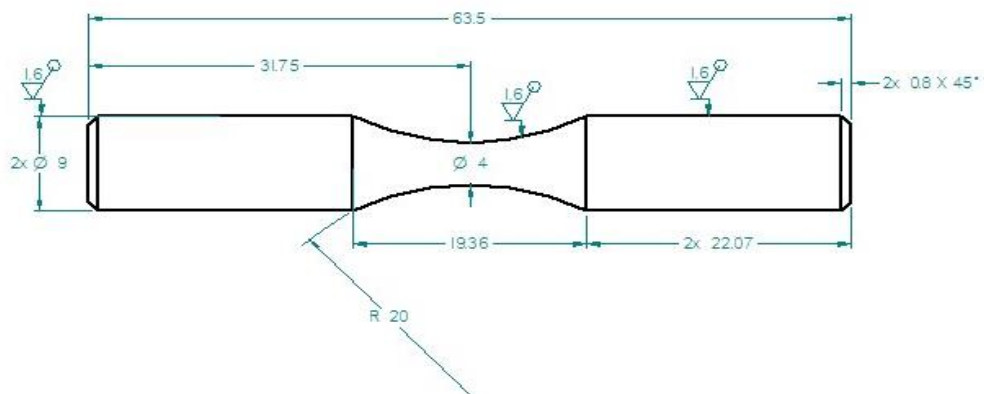


Figura 46. Dimensiones geométricas de probeta para fallo a fatiga.  
Fuente: P.A.HILTON LTD

Esto con el fin de tener al menos tres probetas para cada situación de acuerdo a la siguiente descripción:



- Tres de las probetas van a tener aplicado el proceso de Shot Peening con los parámetros establecidos en las pruebas que se realizaron en la conexión NC50 API PIN según lo establecido en el presente trabajo de investigación.
- Tres van a tener un granallado básico con granalla angular y con el método que se utilizaba anteriormente a la estandarización de este proceso en Pemarsa Oilfield Services S.A.
- Tres últimas no van a tener ningún tipo de proceso superficial adicional.

Esta prueba de fatiga se hace con el fin de comparar los resultados de ciclos de vida para los tres tipos de procesos y determinar el porcentaje del aumento en la resistencia a la fatiga del Shot Peening estandarizado vs los otros dos procesos.

Se utiliza la máquina de fatiga rotativa HSM19 mk3 (figura 47) de la marca P.A. Hilton LTD, y las pruebas de fatiga se realizan en el laboratorio de mecánica de materiales de la Fundación Universitaria Los Libertadores.



Figura 47. HSM 19 Máquina de fatiga rotativa.  
Fuente: P.A. HILTON LTD.

La prueba se realiza basado en las indicaciones del manual de instrucciones de la HSM19 mk3, donde se establecen los parámetros de carga según el esfuerzo a aplicar de la siguiente forma:

$$\sigma = \frac{125,7P*32}{\pi*4^3} = 20P \left( \frac{N}{mm^2} \right) \quad (4)$$

Dónde:  $\sigma$  es el esfuerzo de prueba en la probeta.

$P$  es la carga sometida por la máquina.

Las probetas se fabrican en NMDC P530 en cual según el certificado de material tiene un límite de esfuerzo elástico de 825MPa y un esfuerzo ultimo de tracción 900MPa. No se debe someter las probetas a un esfuerzo mayor al límite de esfuerzo elástico, así que se toma el 90% de este valor para el esfuerzo de la prueba que corresponde a 742,5 MPa (HI-TECH EDUCATION). Se somete la probeta a una carga de 37N, para obtener un esfuerzo de prueba de 740MPa a partir de la ecuación (4). Finalmente después de realizadas las pruebas de falla a fatiga se consigna en un cuadro comparativo los resultados de ciclos de vida de las 9 probetas de prueba en sus diferentes condiciones de Shot Peening.

## 7. RESULTADOS Y ANÁLISIS.

### 7.1. PRUEBA DE SHOT PEENING.

#### 7.1.1. Parámetros establecidos:

La tabla 15 muestra los parámetros establecidos para la prueba de Shot Peening en tiras de prueba Almen:

UNIDAD	MAGNITUD
INTENSIDAD	0,014 - 0,018 A
COBERTURA	COMPLETA (100%)
TIPO DE GRANALLA	CAST STEEL SHOT S170
DUREZA DE GRANALLA	40 - 51 HRC
ANGULO DE INCIDENCIA	90°
PRESIÓN DE AIRE	30 PSI
DISTANCIA ENTRE BOQUILLA Y PIEZA	50mm - 100mm
DIÁMETRO DE SALIDA DE BOQUILLA	8mm

**Tabla 15. Parámetros de segunda prueba de Shot Peening.**  
Fuente: El autor.

### 7.1.2. Altura de curvatura en tiras de prueba Almen:

Realizada la prueba de Shot Peening se procede a medir la altura de la curvatura en las tiras de prueba Almen: (Tabla 16)

TIRA ALMEN No.	TIEMPO (s)	ALTURA 1 (in)	ALTURA 2 (in)	ALTURA 3 (in)	ALTURA PROMEDIO (in)	PRESIÓN (PSI)
1	10	0,008	0,008	0,009	0,008	30
2	10	0,011	0,011	0,011	0,011	30
3	10	0,009	0,009	0,010	0,009	30
4	10	0,010	0,009	0,011	0,010	30
5	20	0,013	0,013	0,014	0,013	30
6	20	0,014	0,014	0,014	0,014	30
7	20	0,016	0,015	0,016	0,016	30
8	20	0,015	0,015	0,015	0,015	30
9	40	0,017	0,016	0,017	0,017	30
10	40	0,015	0,016	0,016	0,016	30
11	40	0,017	0,016	0,017	0,017	30
12	40	0,017	0,017	0,018	0,017	30
13	80	0,018	0,017	0,018	0,018	30
14	80	0,019	0,018	0,019	0,019	30
15	80	0,019	0,019	0,019	0,019	30
16	80	0,019	0,019	0,020	0,019	30

**Tabla 8. Altura de curvatura en tiras de prueba Almen de segunda prueba de Shot Peening.**  
Fuente: El autor.

Se procede a realizar un promedio final entre las tiras de prueba Almen con tiempos iguales de 10s, 20s, 40s, 80s, para así obtener un dato definitivo por cada tiempo de exposición: (Tabla 17)

TIEMPO (s)	ALTURA PROMEDIO (in)
10	0,010
20	0,015
40	0,017
80	0,019

**Tabla 9. Promedio de altura de arco para tiempos iguales.**  
Fuente: El autor

### 7.1.3. Solucionador de curva de saturación:

Obtenidos los datos promedios de las alturas de curvatura en tiras de prueba Almen, se procede a ingresar los valores en el solucionador de curva de saturación SCS1 según las indicaciones anteriormente descritas en el punto 6.1.3. Elaboración de la curva de saturación. (Tabla 18)

PROGRAMA SOLUCIONADOR DE CURVA DE SATURACION SCS1									
EXP2P STANDARD vers.09									
Tir a No.	Tiempo	Altura arco	Prebow	Corrección	Calculo	Residuals	Res. Sqrd.	Parámetros	Valores
				Altura	Y			a	18,23
	0	0	0	0	0	0	0	b	0,08
1	10	10		9,66667	9,6559	-0,01077	0,000116029	Valor inicial para a=	18,6666667
2	20	15		14,5	14,198	-0,30222	0,091337307		
3	40	17		16,5833	17,339	0,75573	0,571131156	Intensidad =	16,41
4	80	19		18,6667	18,188	-0,47881	0,229260872	T =	30,53
8				0	0	0	0	Si aparece <b>ADVERTENCIA</b> o <b>ERROR</b> sobre estas celdas leer	
9				0	0	0	0	Las notas junto a la gráfica.	
Lower Spec.=				14		SUM =	0,8918	RMS-R=	0,4722
Upper Spec.=				18					

Tabla 18. Resultados de solucionador de curva de saturación SCS3 de primera prueba de Shot Peening.  
Fuente: El autor

7.1.4. Curva de saturación:

Al ejecutar el Solver del solucionador de curva de saturación se genera la siguiente gráfica: (figura 48)

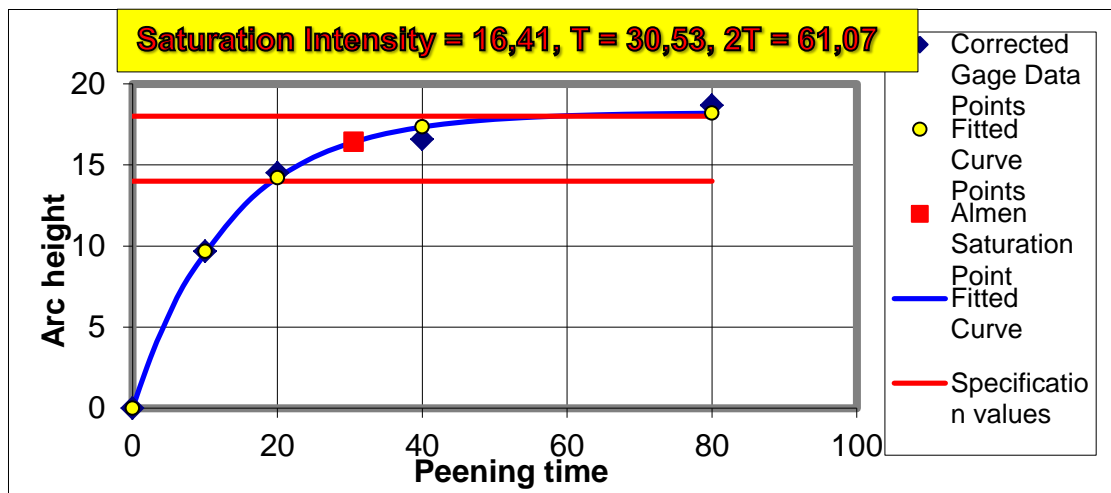


Figura 48. Curva de saturación de segunda prueba de Shot Peening  
Fuente: El autor.

A partir de los resultados de la curva de saturación obtenida de la segunda prueba de Shot Peening se establece una intensidad Almen de 16,41 ó 16A que se encuentra dentro del rango establecido en los parámetros iniciales (tabla 14). El tiempo de exposición para obtener dicha intensidad es de 30,5s y un periodo doble de exposición de 61s. Se determina como una **PRUEBA EXITOSA** y termina el proceso de estandarización de parámetros en el proceso de Shot Peening para conexiones rotarias de hombro.

## 7.2. PRUEBA DE FALLA A FATIGA.

A continuación se muestran los resultados del sometimiento a fatiga rotativa con un esfuerzo de 740MPa a 9 probetas según las siguientes clasificaciones: (Tabla 19)

NUMERO DE CICLOS DE FALLA A FATIGA			
NUMERO DE ENSAYO	PROBETAS SIN SHOT PEENING	PROBETAS CON SHOT PEENING REGULAR	PROBETAS CON SHOT PEENING ESTANDARIZADO
1	10735	10235	18755
2	10659	11391	22850
3	10534	10832	19674

Tabla 19. Numero de ciclos de falla a fatiga para probetas con y sin Shot Peening  
Fuentes: El autor

A partir de la tabla 19 se obtiene la siguiente gráfica:

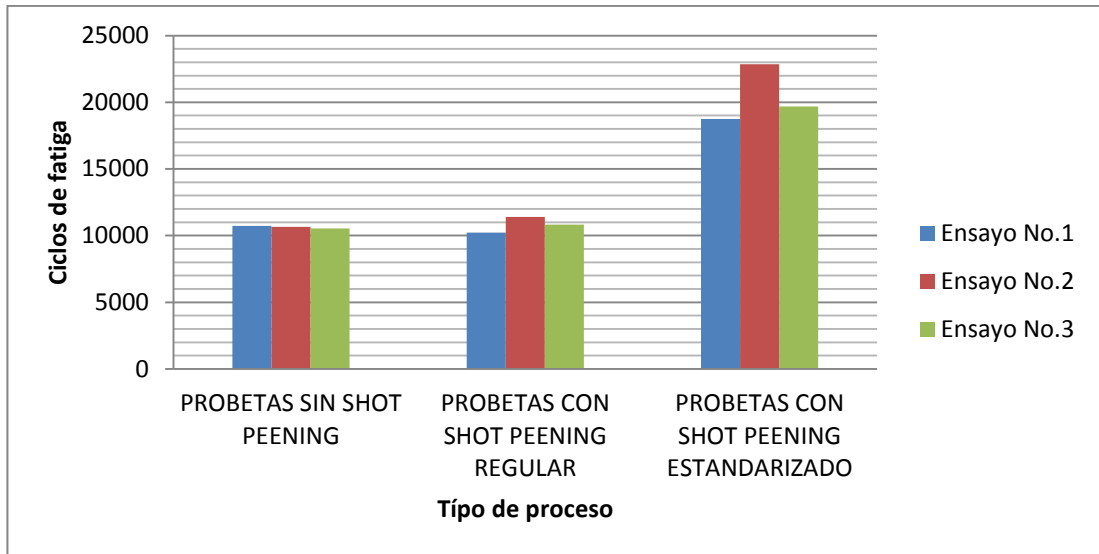


Figura 49. Grafico comparativo de ciclos de falla a fatiga del proceso de Shot Peening.  
Fuente: El autor.

Realizando una media aritmética a cada uno de los valores se obtiene los siguientes resultados:

- Ciclos de vida promedio en probeta sin Shot Peening: **10643**
- Ciclos de vida promedio en probeta con Shot Peening regular: **10819**
- Ciclos de vida promedio en probetas con Shot Peening estandarizado: **20426**

Al comparar los resultados obtenidos de ciclos de vida a fatiga de probetas con proceso de Shot Peening estandarizado vs probetas con Shot Peening regular se obtiene un aumento a la resistencia a la fatiga de **89%**. Realizando la misma comparación entre probetas con Shot Peening estandarizado vs probetas sin Shot Peening se obtiene un aumento en la resistencia a la fatiga de **92%**.

Cabe mencionar que el Shot Peening regular era el proceso que se realizaba anteriormente en las conexiones rotarias de hombro de Pemarsa S.A. antes de estandarizar el proceso. No se tenía registro de parámetros ni control en los mismos, se hacía el proceso de forma artesanal sin ningún tipo de control.

## 8. CONCLUSIONES

Se logra establecer los parámetros definitivos para asegurar un proceso de Shot Peening estandarizado según los datos de la tabla 14. La magnitud de intensidad Almen se cumple con un valor de 16A el cual se encuentra en el rango de intensidad pre-establecido, donde se varia la presión de granallado de 50PSI a 30PSI con respecto a la prueba piloto, ya que la presión inicial era tan alta que no se podía mantener constante en la ejecución del proceso en sus diferentes tiempos de exposición. Es importante notar que la presión es un parámetro crítico del proceso el cual debe ser controlado, puesto que la variación de la misma origina que la curva de saturación creada a partir de los datos obtenidos con presión variable no tenga el comportamiento logarítmico ascendente requerido en el proceso para determinar satisfactoriamente el punto de intensidad Almen. La presión está relacionada directamente con el resultado de la intensidad Almen ya que la prueba piloto tenía una presión de 50PSI y en el primer punto que corresponde a 10s la tira de prueba Almen ya tenía una altura de 19 $\mu$ in lo cual estaba por encima del rango de intensidad establecido entre 14A-18A, por esta razón y la dificultad de controlar una intensidad alta se decide cambiar la presión del proceso de Shot Peening.

Se determina que el proceso de Shot Peening aumenta efectivamente la resistencia a la fatiga por medio del impacto de la granalla esférica a la superficie del material tratado con el proceso. La prueba de fatiga que se realiza sobre probetas tratadas con proceso de Shot Peening estandarizado arroja un aumento en la resistencia a la fatiga entre un 89% y un 92% con respecto a las probetas con el tratamiento de Shot Peening regular y probetas sin Shot Peening respectivamente.

Finalmente con el proceso de Shot Peening estandarizado se elabora el manual de procedimiento para la ejecución del Shot Peening sobre conexiones rotarias fabricadas y reparas en Pemarsa Oilfield Services S.A. el cual describe detalladamente la forma correcta de ejecutar el proceso de Shot Peening a partir de proceso realizado según el título 6. Metodología experimental de este proyecto.

## BIBLIOGRAFÍA

- AMS, Peening Media, General Requeriments, AMS 2431, SAE AEROSPACE, 2006.
- AMS, Shot Peening of Metal Parts, AMS-S-13165, SAE AEROSPACE, 2007.
- API 7-1 Specification for Rotary Drill Stem Elements, Primera edición 2006 – AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE.
- API 7-2 - Specification for Threading and Gauging of Rotary Shouldered Thread Connections. Primera edición 2006. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE.
- BOHLER UDDEHOLM, 4145H Modified API Spec 7. Australia.
- CAMMETT, John. Are you peening too much? The Shot Peener. Shot Peening school. Summer 2014.
- CAVO Drilling Motors. Manual de operaciones del motor. Houston, Texas. Cuarta edición (4,3). 2005 Pág. 2 – 9.
- CHAMPAIGNE, Jack. Shot Peening Overview. Electronics Inc. Mishawaka, 2001.
- CORROSION MATERIALS, Alloy K-500 Datasheet.
- CURTISS WRIGHT, “El proceso de Shot Peening o perdigoneado – como funciona” (En línea) (Consultado 30 julio de 2015) Disponible en Internet:  
<https://www.google.com.co/search?q=shot+peening&espv=2&biw=1366>



<https://www.researchgate.net/publication/3599599?source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0CAYQAUoAWoVChMIi46Qn6GExwIVRSUeCh3CXwy7&dpr=1#imgrc=enAo1KiSPzPEBM%3A>

- 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.
- ELECTRONICS INC, Shot Peening Control. Disponible en línea: <https://www.electronics-inc.com/>
- ESTREMS AMESTOY, Manuel. Principios de mecanizado y planificación de procesos. Cartagena, 2007; Pág. 27.
- GRANALLADORA AMERICANA S.C.A. Informa Shot Peening, Buenos Aires – Argentina 2008, Pág. 1,2.
- HERBERT, E.G. The superhardness of hard steel, citado por JARAMILLO, Héctor. El Shot Peening y la vida útil a la fatiga de elementos de máquinas.
- HI-TECH EDUCATION – HSM19 mk3 Rotating Fatigue Machine – Instruction manual. Pág. 1-16
- HOFF~NANNJ, II Lihe, 11. (1987). Macheraoch, In: Wolilfahri, H.; Kopp, R., Vohringcr, o. (e tls), Proc. ICPS3, Gannisch-Partenkirclien, DGM Verlag, Oberurscl, Gennany.
- HONG OOI Y SHAW (2008). A numerical simulation to relate the shot peening parameters to the induced residual stresses. Engineering Failure Analysis.

- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIONES (ICONTEC). NTC1486, Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado, y otros trabajos de investigación, Bogotá, D.C.
- JAMES, M. R., & Lu, J (1996). Handbook of measurement of residual stress. Edit. Jian Lu, The Fairmont Press, Inc. United States.
- JARAMILLO SUAREZ, Héctor Enrique. El Shot Peening y la vida a la fatiga de elementos de máquinas. Cali – Universidad Autónoma de Occidente, 2013. 206 p. 2013.
- LU, J (1996). Hand Book of measurement of residual stress, New York. Society of Experimental Mechanics, Inc.
- LUNDBERG Mattias, LIN PENG Ru, AHMAD Maqsood, VUORISTO Taina, BÄCKSTRÖM Daniel, JOHANSSON Sten - Influence of Shot Peening Parameters on Residual Stresses in Flake and Vermicular Cast Irons - Department of Management and Engineering, Linköping University, SE-58183 Linköping, Sweden, Base Engine & Materials Technology, Volvo Powertrain, SE-40508 Gothenburg, Sweden, Testing Methods and Testing, Scania CV AB, SE-15187 Södertälje, Sweden.
- METAL IMPROVEMENT COMPANY. INC, Shot Peening – aplicaciones, Octava edition, Subsidiary of Curtiss – Wright Corporation, 2001.
- MILITARY PLATING SPECIFICATIONS, En line. (Consultado 27 agosto 2015). Disponible en internet: <http://www.ultraplating.com/specs.pdf>.

- P.A.HILTON LTD – Enginnering Teaching Equipment – HSM19 Rotating Fatigue Machine. (Consultado 07 noviembre 2016). Disponible en internet: <http://www.p-a-hilton.co.uk/products/HSM19-Rotating-Fatigue-Machine>.
- RICK, David, Shot Peening Coverage: Prediction and Control, Academic Study, The Shot Peener, Coventry University, U.K. 2012.
- RICK, David, Shot Peening Coverage Requirements, Academic Study, The Shot Peener, Coventry University, U.K. 2012.
- SAE, Shot Peening Coverage, SAE J2277, SAE INTERNATIONAL; 2003.
- SAE, Shot Peening, SAE J2441, SAE INTERNATIONAL, 2000.
- SAE, Test Strips, Holding Block and Gauge for Shot Peening. SAE J442, SAE INTERNATIONAL; 2001.
- SAE, Procedures for Using Standard Shot Peening Test Strip. SAE J443, SAE INTERNATIONAL; 2003.
- SATURATION CURVE SOLVER, User's Instruction Manual. – ELECTRONICS INC. 2009.
- SCHOELLER BLECKMANN SALES CO, INC – Material certification - certificate acc. EN 10204 – P530.
- SURFACE INTEGRITY, Tech Report, Manufacturing Engineering; July 1989.

- VIELMA. A.T., LLANEZA V, BELZUNCE F.J., Shot peening intensity optimization to increase the fatigue life of a quenched and tempered structural steel – Material Science Department, University of Oviedo, Gijon – Spain, 2014.
- WALPOLE. Ronald E, MYERS. H Raymond, MYERS. L Sharon – Probabilidad y estadística para ingenieros. Sexta Edición. Prentice- Hall Hispanoamerica, S.A. México 1999.
- WHEELABRATOR CORP, Shot Peening. Mishawaka – Indiana, 1959.
- WHEELABRATOR SHAPING INDUSTRY, “¿Que es Shot Peening?” En línea. (Consultado 19 Agosto 2015) Disponible en internet:  
[http://www.wheelabratorgroup.com/es/sites/wheelabrador/content/about\\_us/about\\_wheelabrador/what\\_is\\_shot\\_peening.aspx](http://www.wheelabratorgroup.com/es/sites/wheelabrador/content/about_us/about_wheelabrador/what_is_shot_peening.aspx).
- WILLIAMS, S, R. Hardness and hardness measurements. Ohio: American Society for Metals, 1942.