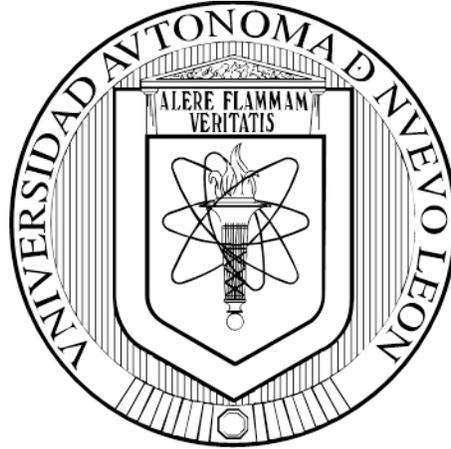


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**



TESIS

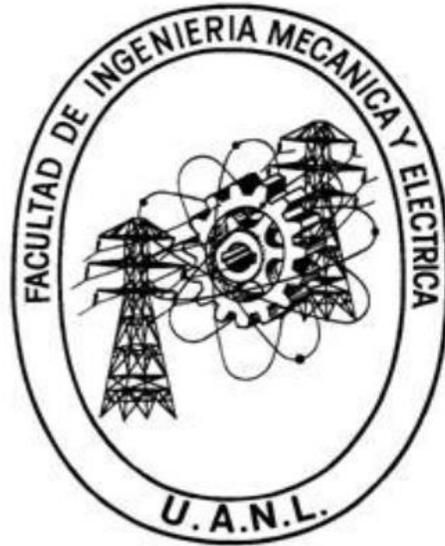
**MEDICIÓN DE ESFUERZOS RESIDUALES MEDIANTE LA
TÉCNICA DE REPLICACIÓN DE INDENTACIONES EN
MONOBLOQUES V8 DE ALUMINIO**

**POR
JORGE ALBERTO AGUILAR NAVARRO**

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

ENERO, 2017

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



TESIS

MEDICIÓN DE ESFUERZOS RESIDUALES MEDIANTE LA TÉCNICA
DE REPLICACIÓN DE INDENTACIONES EN MONOBLOQUES V8 DE
ALUMINIO

POR

JORGE ALBERTO AGUILAR NAVARRO

EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN, MÉXICO ENERO DE 2017

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis “Medición de Esfuerzos Residuales Mediante la Técnica de Replicación de Indentaciones en Monobloques V8 de aluminio” realizada por el Ing. Jorge Alberto Aguilar Navarro, con número de matrícula 1770312, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Automotriz.

El Comité de Tesis



Dr. Jacobo Hernández Sandoval

Director



Dr. Javier Rodrigo González López

Revisor



Dr. José Alejandro González Villareal

Revisor

Vo.Bo.



Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirector de Estudios de Posgrado

DEDICATORIA

A Luz María Navarro Hernández y a Salvador Aguilar Domínguez por su amor.

El amor es una tentativa de penetrar en otro ser, pero sólo puede realizarse a condición de que la entrega sea mutua. En todas partes es difícil este abandono de sí mismo; pocos coinciden en la entrega y más pocos aún logran trascender esa etapa posesiva y gozar del amor como lo que realmente es: un perpetuo descubrimiento, una inmersión en las aguas de la realidad y una recreación constante.

Octavio Paz “El laberinto de la soledad”

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. Jacobo Hernández Sandoval asesor de mi tesis. Así como al Dr. José Talamantes Silva, al Dr. Andrés Fernando Rodríguez Jasso, al Dr. José Alejandro González Villareal y al Dr. Javier Rodrigo González López por formar parte del Comité de Tesis, por sus valiosas sugerencias e interés, en la revisión del presente trabajo.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León, con especial atención a todos los profesores de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería Automotriz y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico para la realización de mis estudios. A la empresa Nemark y a todas las excelentes personas del departamento de Desarrollo e Investigación que ahí trabajan. Así como al Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería Aeronáutica por permitirme el uso de su equipo y su invaluable ayuda en el desarrollo de este estudio.

A mi familia por el apoyo moral que siempre me ha brindado y a todas las personas que contribuyeron de una forma u otra en la realización de este trabajo.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación presenta la Técnica de Replicación de Indentaciones para la medición de esfuerzos residuales en los puentes entre cilindros en siete monobloques V8 de aluminio. Esta técnica mide el cambio en el espaciamiento entre pares de huellas antes y después de un relevado de esfuerzos, relacionando esta deformación mediante la ley de Hooke con los esfuerzos residuales, empleando el Sistema de Replicación de Indentaciones para transferir la superficie de los puentes entre cilindros en réplicas positivas, precisas y estables, con una variación de $\approx +2 \mu\text{m}$ respecto a las mediciones directas del espaciamiento entre pares de huellas, ofreciendo resultados precisos y adecuados para numerosas aplicaciones por su versatilidad, almacenamiento y transportación de las réplicas, para la medición de esfuerzos residuales.

La Técnica de Replicación de Indentaciones al igual que la Técnica de Galgas Extensométricas Uniaxiales para la medición de la deformación en los puentes entre cilindro, revelaron que los esfuerzos residuales estaban sometidos a tensión, donde la dirección del máxima esfuerzo es tangencial a las camisas de hierro gris. El mapeo de esfuerzos residuales reflejó campos de esfuerzos a lo largo de los puentes entre cilindros, los cuales se asocian a factores geométricos vinculados al cambio de espesor, aumentando considerablemente la magnitud de los esfuerzos residuales al disminuir el espesor debido a la distribución de la carga en un área menor, concentrándose el máximo esfuerzo al centro de los puentes entre cilindros.

El procesamiento de datos y los análisis estadísticos de la evaluación de esfuerzos residuales al centro de los puentes entre cilindros mediante la Técnica de Replicación de Indentaciones y la Técnica de Galgas Extensométricas fue estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95.0% ($\alpha=0.05$).

ÍNDICE

DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMINETO.....	ii
RESUMEN.....	iii
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO II ANTECEDENTES.....	4
2.1. Aleaciones de aluminio–silicio	4
2.1.1. Propiedades del aluminio y sus aleaciones	4
2.1.2. Aleaciones de aluminio–silicio para vaciado.....	6
2.2. Microestructura en aleaciones de aluminio A319.....	9
2.2.1. Tamaño de Grano.....	10
2.2.2. Modificación de la fase eutéctica aluminio-silicio	11
2.2.3. Estructura dendrítica y espaciamiento dendrítico secundario.....	13
2.2.4 Compuestos intermetálicos	15
2.2.5. Porosidad.....	16
2.2.5.1. Porosidad por contracción.....	16
2.2.5.2. Porosidad por hidrogeno	17
2.3. Tratamientos térmicos.....	17
2.3.1 Clasificación de tratamientos térmicos en aleaciones de aluminio.....	18
2.3.1.1. Tratamiento de Solubilización	19
2.3.1.2. Enfriamiento rápido	20
2.3.1.3. Tratamiento de envejecido o endurecimiento por precipitación	20
2.4. Propiedades Mecánicas	21
2.4.1. Ley de Hooke.....	23
2.5. Esfuerzos residuales.....	25
2.5.1. Clasificación del origen de esfuerzos.....	26
2.5.1.1. Deformación heterogénea	26
2.5.1.2. Cambios de fase	27
2.5.1.3. Gradientes térmicos.....	28
2.5.2. Efectos causados por presencia de esfuerzos residuales.....	30
2.5.3. Métodos de medición de esfuerzos residuales	31
2.5.3.1 Hole drilling (HD).....	33

2.5.3.2. Método de Seccionamiento	35
2.5.3.3. Difracción de Rayos-x.....	36
2.5.3.4. Difracción de neutrones	36
2.5.3.5. Galgas extensométricas	37
2.7.3.6. Técnica de medición del cambio en el espaciamiento entre pares de indentaciones de dureza	50
2.7.3.7. Sistema de Replicación Metalográfica (RepliSet)	54
CAPÍTULO III PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	58
3.1. Introducción	58
3.2. Características del producto automotriz.....	59
3.2.1. Composición química	59
3.2.2. Microestructura	60
3.2.3. Tratamientos térmicos.....	63
3.3. Técnica de galgas extensométricas	64
3.3.1. Preparación de los puentes entre cilindros	64
3.3.2. Medición de esfuerzos residuales	69
3.4. Técnica de replicación de indentaciones.....	72
3.4.1. Preparación de los puentes entre cilindros.....	73
3.4.3 Medición de esfuerzos residuales	77
3.5. Validación del sistema de replicación de indentaciones	79
3.6. Mapeo de esfuerzos residuales.....	80
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	83
4.1. Introducción	83
4.2. Composición química.....	83
4.3. Caracterización microestructural	84
4.4. Validación del sistema de replicación de indentaciones	86
4.5. Medición de Esfuerzos Residuales para la Validación del Sistema de Replicación de Indentaciones.....	86
4.6. Medición de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas vs la técnica de replicación de indentaciones	106
4.7. Mapeo de esfuerzos residuales.....	125
CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	146
4.1. Conclusiones	146
4.2. Recomendaciones.....	147

REFERENCIAS.....	149
LISTA DE TABLAS.....	154
LISTA DE FIGURAS.....	157
APÉNDICE.....	164
A.1. Técnica de Galgas Extensométricas de las Pruebas (A, B, C, D y E).....	164
A.2. Técnica de Indentaciones de las Pruebas (A, B, C, D y E).....	165
A.3. Técnica de Replicación de Indentaciones de las Pruebas (A, B, C, D y E).....	166
A.4. Técnica de Galgas Extensométricas de la Prueba F.....	167
A.3. Técnica de Replicación de Indentaciones de la Prueba F.....	168
A.5. Técnica de Galgas Extensométricas de la Prueba G.....	169
A.3. Técnica de Replicación de Indentaciones de la Prueba G.....	169

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El uso de aleaciones de aluminio para aplicaciones automotrices ha crecido de forma acelerada en los últimos cincuenta años. Después del acero, el material más utilizado en la manufactura de vehículos es el aluminio. La principal ventaja de usar aluminio en lugar de acero es su superior relación resistencia/peso, siendo menor la densidad del aluminio que promueve un menor consumo de combustible al ser más ligeros los vehículos, ayudando a cumplir con las legislaciones de los gobiernos relacionadas a la reducción de las emisiones de carbono y sobre todo se reduce el impacto medioambiental. Las aleaciones de aluminio-silicio tienen excelente fluidez en los procesos de colada, buenas propiedades mecánicas logradas mediante la adición de aleantes, y a su excelente respuesta a tratamientos térmicos. Además su reciclaje es cada vez más rentable. Todo esto hace de las aleaciones de aluminio-silicio sean materiales ideales para la manufactura en procesos de vaciado de monobloques de motor. El monobloque, es uno de los componentes más importantes del motor de combustión interna en vehículos, su función es alojar el tren alternativo, formado por el cigüeñal, las bielas y los pistones. Además cuenta con circuitos internos de refrigeración y lubricación.

El uso de aleaciones de aluminio-silicio en monobloques está limitado en parte, por la falta de resistencia al desgaste por los anillos montados en los pistones, es por esto que requieren la inserción de camisas de hierro gris. Las camisas se pueden insertar en el monobloque después de un mecanizado o se pueden colocar en el molde previo a la colada del aluminio. El último método permite una mayor productividad y bajo costo. Sin embargo, la diferencia en el coeficiente de expansión entre el aluminio y el hierro provoca que durante el enfriamiento (solidificación) se propicie la formación de esfuerzos residuales a lo largo de las camisas de cilindros por diferencias de velocidad de contracción, causando distorsión y/o falla prematura al existir fuerzas actuando sobre un área muy delgada como lo son los puentes entre cilindros.

Los esfuerzos residuales se pueden definir como los esfuerzos que quedan en un material al desaparecer las fuerzas que actuaban sobre él, o bien como los esfuerzos que permanecen en un material después del proceso de manufactura en ausencia de cargas y/o gradientes térmicos externos. Es posible clasificar el origen de los esfuerzos residuales debido a deformación plástica heterogénea, gradientes térmicos y/o cambios de fase. Los esfuerzos residuales pueden presentarse a tensión y compresión. A diferencia de los de compresión, los esfuerzos en tensión son indeseables debido a que permiten la propagación y crecimiento de grietas existentes en regiones críticas en el monobloque. Cuantificar los esfuerzos residuales en estas zonas críticas nos permite evitar aproximarnos a los límites de resistencia del material durante el procesamiento (vaciado, tratamiento térmico, maquinado, etc.) o bien durante la vida de servicio del monobloque.

Existe una gran variedad de metodologías para la medición de esfuerzos residuales, como la difracción de rayos X y neutrones, estas técnicas requieren de equipos costosos y operadores altamente capacitados. Algunas otras como el Hole-Drilling (ASTM E 837) requiere de perforaciones en el componente volviéndolo inútil. En la industria automotriz el uso de galgas extensométricas se ha vuelto una herramienta muy útil para la evaluar de esfuerzos residuales en productos automotrices como los monobloques de aluminio, se toma una lectura directa de la deformación longitudinal antes y después de un relevado de esfuerzos, relacionando dicha deformación con los esfuerzos residuales mediante a ley de Hooke (ecuación 1.1).

$$\sigma = E (\varepsilon_0 - \varepsilon_1) \quad (1.1)$$

La principal ventaja de las galgas extensométricas en la medición de esfuerzos residuales es su capacidad para detectar variaciones longitudinales extremadamente pequeñas y convertirlas en variaciones de resistencia eléctrica. Aunque es un método confiable y utilizado en la industria automotriz, no está exento de algunas desventajas: es un método destructivo, es necesario una superficie plana para su aplicación, es sensible a la degradación térmica, tiene señales de salida relativamente bajas, se requiere de personal capacitado y un procedimiento cuidadoso en la instrumentación demandando mucho

tiempo, se debe de realizar en un lugar en condiciones de humedad y temperatura controladas. Además, esta técnica no es completamente adaptable a geométricas complejas.

Recientemente se ha presentado una nueva técnica para medir esfuerzos residuales superficiales, mediante el uso de un equipo sencillo y fácilmente disponible. La técnica consiste en la medición del cambio en el espaciamiento entre pares de indentaciones de dureza, después de un relevado de esfuerzos. La motivación de los autores J.E. Wyatt y J.T. Berry fue la explotación de las ventajas potenciales que el mecanizado de alta velocidad (HSM) ofrece a la industria con respecto a los esfuerzos residuales inducidos.

El presente trabajo de investigación plantea los objetivos de la evaluación metalográfica de los puentes entre cilindros, la validación del Sistema de Replicación de Indentaciones y la evaluación de esfuerzos residuales en 42 puentes entre cilindros correspondientes a siete monobloques V8 de aluminio mediante la Técnica de Galgas Extensométricas y la Técnica de Replicación de Indentaciones. Esta última inspirada en la técnica de medición del cambio en el espaciamiento entre pares de indentaciones de dureza, en conjunto con el sistema de replicación (ASTM E 1351) para transferir la superficie de los puentes entre cilindros en réplicas positivas, estables y altamente precisas. La hipótesis nula (h_0) de este trabajo establece que la variabilidad de las medias entre la técnica de galgas extensométricas y la replicación de indentaciones para la evaluación de esfuerzos residuales en cada una de las pruebas sea estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95.0% ($\alpha=0.05$). Cabe mencionar que la Técnica de Replicación de Indentaciones abriría la posibilidad a estudios no destructivos, favorecida por su versatilidad, almacenamiento y transportación de las réplicas, siendo posible la medición de esfuerzos residuales durante procesos y/o vida útil en productos automotrices y con el potencial para su aplicación en geometrías más complejas.

CAPÍTULO II

ANTECEDENTES

2.1. Aleaciones de aluminio-silicio

El aluminio, es el elemento metálico más abundante en la corteza terrestre sus compuestos forman el 8% de la misma. Se encuentra normalmente en forma de silicato de aluminio (sillimanita, andalucita y cianita) puro o mezclado con otros metales como sodio, potasio, hierro, calcio o magnesio. Además, los silicatos no son menos útiles, porque es extremadamente difícil, y por tanto muy caro extraer el aluminio de ellas. La bauxita, un óxido de aluminio hidratado impuro descubierto en Les Baux, es la fuente comercial de aluminio y de sus compuestos ^{[1], [2]}.

Como resultado de los descubrimientos de Hall-Héroult y de Bayer se hizo económicamente practicable la producción de aluminio a gran escala y sigue siendo el método principal para la producción comercial de aluminio ^[3].

Tabla 2.1. Producción de aluminio ^[3].



2.1.1. Propiedades del aluminio y sus aleaciones

Las propiedades del aluminio y sus aleaciones dependen de una compleja interacción entre su composición química y las características microestructurales desarrolladas durante su solidificación, los tratamientos térmicos y los procesos de deformación a los que se someta ^[6].

Esto lo hacen muy útil en aplicaciones automotrices, por su baja densidad, alta resistencia a la corrosión, es buen conductor eléctrico y térmico, tiene una buena relación resistencia peso, no es tóxico, no es magnético, no produce chispa, no cambia de estructura atómica en estado sólido y tiene un punto de fusión relativamente bajo, a pesar de esto tiene el inconveniente de que en forma pura es muy suave.

Por esta razón el aluminio generalmente se alea con diversos elementos para adquirir dureza entre los cuales, los más frecuentes son: silicio, cobre, manganeso, magnesio y zinc. Por todo ello es desde mediados del siglo XX, el metal que más se utiliza después del acero ^[4].

Tabla 2.2. Propiedades del aluminio ^[2], ^[5].

Propiedades Químicas	
Símbolo químico	Al
Número atómico	13
Peso atómico	26.9815 uma
Radio atómico	0.143 nm
Isótopos	Ninguno
Valencia	3
Estructura cristalina	Cúbica centrada en las caras
Parámetro de red	0.404 nm
Plano de deslizamiento	{111}
Propiedades Físicas	
Densidad	2.7 g/cm ³
Punto de fusión	660°C
Punto de ebullición	2,480°C
Calor de combustión	200 Kcal/at-gr
Cambio de volumen en la solidificación	6.70%
Contracción por vaciado (lineal)	1.7-1.8%
Color-Luz reflejada	Blanco argentado
Propiedades Ingenieriles	
Módulo de elasticidad	72.4 GPa
Módulo de corte	27.5 GPa
Coefficiente de Poisson	0.31
Calor específico promedio (0–100°C)	917 J kg ⁻¹ K ⁻¹
Conductividad térmica (20–100°C)	238 W m ⁻¹ K ⁻¹
Coefficiente de expansión térmica (0–100°C)	23.5x10 ⁻⁶ K ⁻¹
Resistividad eléctrica (20 ° C)	2.67x108 Ω-m
Susceptibilidad magnética 18 ° C x 106	0.63

Tabla 2.3. Solubilidad en sólido de elementos en el aluminio ^[7].

Elemento	Temperatura (°C)	Solubilidad (% Peso)
Cadmio	649	0.4
Circonio	660.5	0.28
Cobalto	657	<0.02
Cobre	548	5.65
Cromo	661	0.77
Germanio	424	7.2
Hierro	655	0.05
Litio	600	4.2
Magnesio	450	17.4
Manganeso	658	1.82
Níquel	640	0.04
Silicio	577	1.65
Plata	566	55.6
Estaño	228	~0.06
Titanio	665	~1.3
Vanadio	661	~0.4
Zinc	443	70

2.1.2. Aleaciones de aluminio–silicio para vaciado

Existe una gran variedad de aleaciones de aluminio, se clasifican principalmente en dos grupos: vaciados en lingotes (foundry ingots aluminium alloys) o directamente vaciados (cast aluminium alloys), y las aleaciones trabajadas (wrough aluminium alloys).

Este estudio se basará en las aleaciones aluminio-silicio para vaciado. Estas aleaciones constituyen un 85 a 90% del total de piezas producidas y están especialmente diseñadas para fluir con cierta facilidad dentro de un molde para obtener productos cuya forma final será prácticamente la obtenida del vaciado, alta resistencia a la corrosión y facilidad para ser unidas mediante soldadura ^[2].

La clasificación de las aleaciones de aluminio que da la American National Standarization Institute (ANSI) ^[9], basada en la Aluminium Association of the United States (organización reconocida internacionalmente), será con la cual se clasificarán en este trabajo las aleaciones de aluminio.

Tabla 2.4. Composición química característica del monobloque V8 de aluminio de aleación A319 (%P/P).

Serie	Principal elemento de aleación
1xx.x	99.00% mínimo de Aluminio
2xx.x	Cobre
3xx.x	Silicio con cobre o magnesio
4xx.x	Silicio
5xx.x	Magnesio
6xx.x	Sin uso
7xx.x	Zinc
8xx.x	Estaño
9xx.x	Otros elementos

- Primer dígito: indica el principal elemento de aleación.
- Segundos dos: identifican a aleaciones de la misma serie o en el caso de la serie 1xx.x, especifica el porcentaje mínimo de aluminio.
- Dígito a la derecha del punto decimal: indica el tipo de producto (0 cuando la pieza vaciada es el producto final y 1 ó 2 cuando es lingote).
- Letras como prefijos siguiendo un orden alfabético (empezando con la A pero omitiendo I, O, Q y X, esta última siendo reservada para aleaciones en etapa experimental: indicar una modificación a la aleación original o un cambio en los límites de las impurezas ^[2], ^[10]).

Esta clasificación se subdivide según incrementan su resistencia mecánica ^[2], ^[10], ^[11].

- Tratables térmicamente, series: 2xxx, 3xxx y 7xxx.
- No tratables térmicamente, series: 1xxx, 4xxx, 5xxx, 8xxx y 9xxx.

Las aleaciones aluminio – silicio para vaciado para este estudio se utiliza en la producción de componentes de ingeniería, tales como monobloques y cabezas de cilindro. Corresponden a las serie AA 3xx.x (Al-Si-Mg), (Si-Cu) o (Si-Mg-Cu) de acuerdo a la Asociación Americana del Aluminio. De este tipo de aleaciones, las más ampliamente utilizadas son las que contiene silicio y cobre. En estas aleaciones el cobre proporciona

resistencia y el silicio facilita el vaciado, reduciendo defectos en el material al ir solidificando; por lo tanto, las aleaciones con contenidos altos de silicio se utilizan para producir piezas de formas intrincadas.

Las aleaciones cuando contienen más de 3% de cobre son tratables térmicamente, aunque normalmente estos tratamientos se realizan cuando la aleación contiene también magnesio, el cual incrementa la respuesta al tratamiento. Las aleaciones de alto silicio (mayor al 10%) presentan baja expansión térmica y presentan algunas ventajas en operaciones a altas temperaturas. Cuando el contenido de silicio excede del 12 ó 13% (puede ser tan alto como el 22%), se presentan cristales primarios de silicio y si se encuentran apropiadamente distribuidos, imparten excelente resistencia al desgaste ^[12].

En general este tipo de aleaciones presentan buena fluidez, resistencia a grietas en caliente, buena soldabilidad, bajos rechupes por solidificación, resistencia a corrosión y resistencia mecánica moderada.

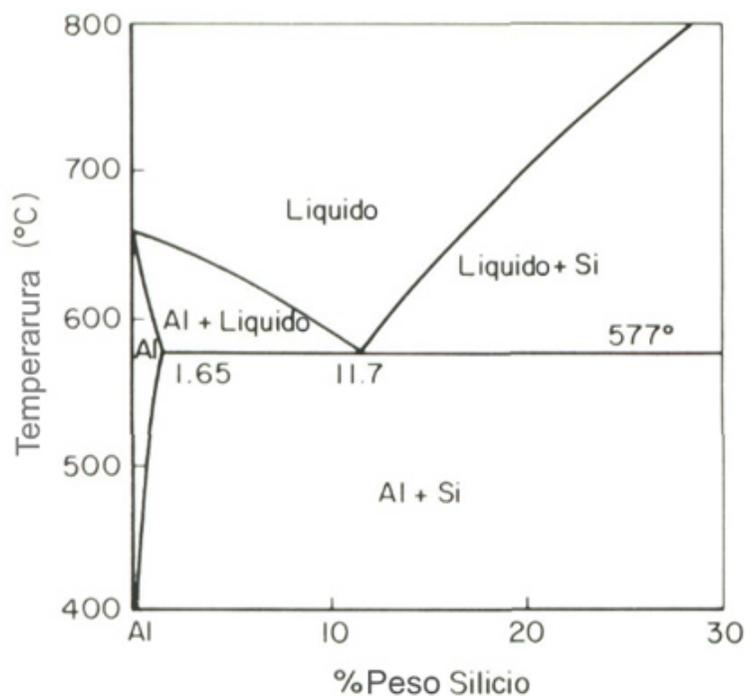


Figura 2.1. Diagrama de fases en equilibrio de Al-Si ^[8].

Tabla 2.5. Composición común de aleaciones aluminio-silicio. Elementos (%P/P); A: Molde de arena; M: Molde permanente; P: Fundición a alta presión [2].

Aleación	Método	Cu	Mg	Fe	Zn	Otros
319.0	A, M	3.5	<0.10	<1.0	<1.0	
332.0	M	3.0	1.0	1.2	1.0	
355.0	A, M	1.25	0.5	<0.06	<0.35	
A356	A, M	<0.20	0.35	<0.2	<0.1	
A357	A, M	<0.20	0.55	<0.2	<0.1	0.05 Be
380.0	P	3.5	<0.1	<1.3	<3.0	
383.0	P	2.5	0.10	1.3	3.0	0.15 Sn
384.0	P	2.0	<0.3	<1.3	<3.0	0.35 Sn
390.0	P	4.5	0.55	<1.3	<0.1	<0.1 Mg
413.0	P	<0.1	<0.10	<2.0	-	
443.0	A, M	<0.3	<.05	<0.8	<0.5	

Tabla 2.6. Características de aleaciones aluminio-silicio. A: Molde de arena; M: Molde permanente; P: Fundición a alta presión (1: Excelente; 5: Pésima) [2].

Aleación	Método de colado	Hermeticidad	Fluidez	Contracción	Resistencia a la corrosión	Maquinabilidad	Soldabilidad
319.0	A, M	2	2	2	3	3	2
332.0	M	2	1	2	3	4	2
355.0	A, M	1	1	1	3	3	2
A356	A, M	1	1	1	2	3	2
A357	A, M	1	1	1	2	3	2
380.0	P	1	2	-	5	3	4
390.0	P	2	2	-	2	4	2
413.0	P	2	1	-	2	4	4
443.0	M	1	2	1	2	5	1

2.2. Microestructura en aleaciones de aluminio A319

La aleación A319 es una aleación a base de aluminio-silicio-cobre (Al-Si-Cu) que contiene entre 6 y 8% en peso de silicio y entre 3 y 4% en peso de cobre [13]. Esta aleación tiene buena capacidad de moldeo, se le atribuye a la relativa alta concentración de silicio, lo que aumenta la fluidez de la aleación lo que hace a estas aleaciones ideales para la fundición de componentes con geometrías complejas. Además, la presencia de cobre y magnesio mejora significativamente la resistencia de la aleación, específicamente después del tratamiento de térmico [14].

Los valores de la composición química de la aleación de aluminio tipo A319 (en porcentaje de peso) son:

Tabla 2.7. Composición característica de la aleación de aluminio tipo A319 (%P/P).

Si	Cu	Fe	Mn	Mg	Zn	Ti	Sr (ppm)	Mn/Fe	Al
7.49	2.91	0.611	0.417	0.285	0.364	0.178	161.6	0.682	86.71

2.2.1. Tamaño de Grano

En las aleaciones aluminio-silicio vaciadas la disminución en el tamaño de grano mejorará notablemente las propiedades mecánicas, aunque sólo será útil, si al tratar de refinar el grano no se incrementan ciertos aspectos como el espaciamiento dendrítico secundario, la cantidad de microporosidad (o que se vuelva del tipo de capas), o el porcentaje en volumen de una segunda fase ^{[15], [16]}.

Esto no se debe al incremento en la densidad de los límites de grano, sino más bien a una distribución más fina tanto de la microporosidad como de las partículas de una segunda fase. Cada grano contiene una familia de dendritas de aluminio y entre sus brazos una mezcla eutéctica; por lo que el control del espaciamiento dendrítico secundario (EDS) y la modificación es mucho más importantes que el proceso de refinamiento de grano. Existen dos métodos de refinamiento de grano ^{[15], [11], [17]}.

- Métodos químicos: Consiste en adicionar a la aleación en estado líquido agentes de nucleación (titanio de 0.02 a 0.15% y boro de 0.01% en peso), que sirven como núcleos activos incluso a bajas velocidades de enfriamiento ^[17].
- Enfriamiento rápido: Los núcleos presentes en el líquido se activan durante la solidificación utilizando una alta velocidad de enfriamiento ^[17].

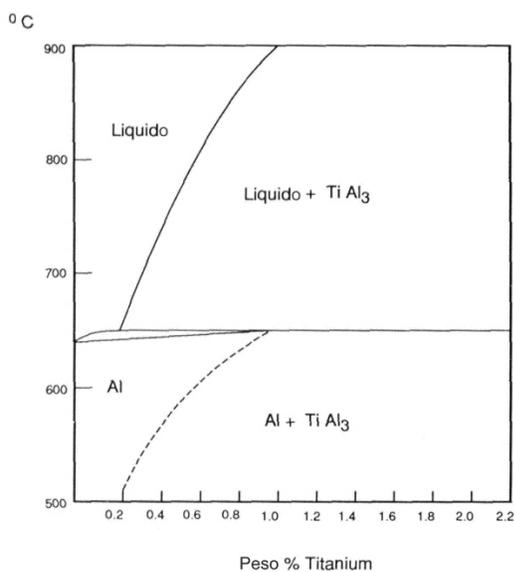


Figura 2.2. El extremo rica en aluminio del diagrama de fases Al-Ti ^[17].

2.2.2. Modificación de la fase eutéctica aluminio-silicio

Las aleaciones de Al-Si de composición cercana al eutéctico con contienen silicio en un porcentaje del 5 al 12% son las aleaciones que se utilizan más comúnmente en la industria de la fundición. Cuando se emplean estas aleaciones sin modificar se forman cristales en forma de placas en la mezcla eutéctica de aluminio-silicio durante la solidificación (figura 2.4.) ^[15].

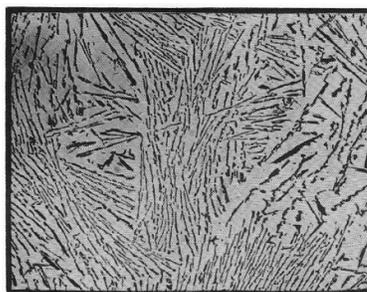


Figura 2.3. Microestructura óptica. Aleación Al-12,5% Si. Estructura no modificada. X 200 ^[26].

Estas agujas de silicio concentran esfuerzos y reducen la tenacidad y la ductilidad, igualmente tienden a disminuir la fluidez del metal y se dificulta la alimentación del metal fundido mientras ocurre el proceso de solidificación, por lo que la estructura posee bajas propiedades mecánicas y una pobre maquinabilidad.

Con el objetivo de incrementar las propiedades mecánicas de las aleaciones aluminio silicio, se provocan cambios morfológicos en el silicio eutéctico, de un aspecto acicular a uno fibroso, los cuales reciben el nombre de modificación; existen dos tipos de esta: química y por enfriamiento rápido ^{[17], [18]}.

La AFS (American Foundrymen's Society) divide esta gama de estructuras en seis niveles de modificación: el nivel 1 corresponde a una estructura sin modificar; a los niveles del 2 al 4, estructuras parcialmente modificadas; el nivel 5 a una estructura completamente modificada y el nivel 6 a una estructura sobremodificada ^[17].

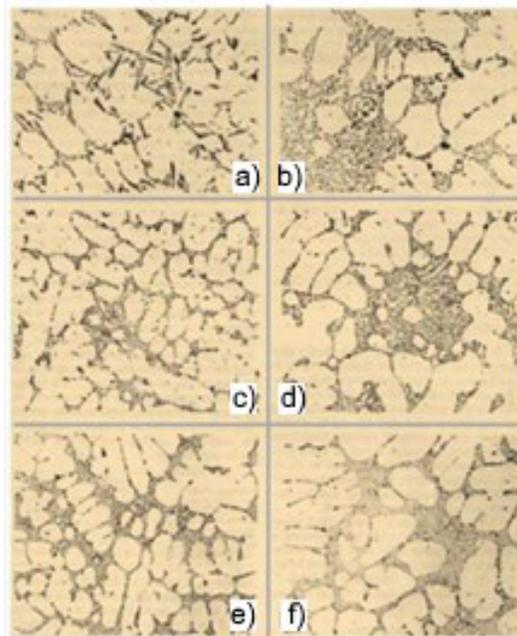


Figura 2.4. Estructuras del Silicio eutéctico modificado químicamente: a) Nivel 1 - Sin modificar, b) Nivel 2 – Laminar, c) Nivel 3 – Modificada Parcialmente, d) Nivel 4 – Ausente de Laminas, e) Nivel 5 – Fibrosa, f) Nivel 6 – Sobremodificada ^[22].

2.2.3. Estructura dendrítica y espaciamiento dendrítico secundario

La solidificación de las aleaciones Al-Si presenta una morfología de crecimiento dendrítico. El proceso de solidificación se lleva a cabo con la formación de dendritas dentro de una mezcla sólido-líquido. A la porción central de cada una de las dendritas se le conoce como brazo dendrítico primario, crece en sentido contrario a la dirección del flujo de calor.

El volumen entre los brazos de las dendritas primarias es llamado celda eutéctica y la distancia entre los brazos secundarios de las dendritas se conoce como espaciamiento dendrítico secundario (EDS) o SDAS (Secondary Dendritic Arm Spacing) [18]. El tamaño y espaciamiento de las dendritas están definidos por la velocidad de solidificación (velocidad de enfriamiento) el tamaño está ligado directamente con la respuesta mecánica de las aleaciones (Figura 2.6.) [17]. A mayores enfriamientos (tiempos cortos de solidificación) el espaciamiento dendrítico secundario será menor. Siendo de gran importancia en piezas de aluminio- silicio vaciadas debido a que está estrechamente relacionadas las propiedades mecánicas con el espaciamiento dendrítico secundario (Figura 2.7.) [23]. Entre más pequeño es el EDS las propiedades mecánicas se incrementan (esfuerzo último de tensión, ductilidad y elongación), así como buena respuesta a tratamientos térmicos.

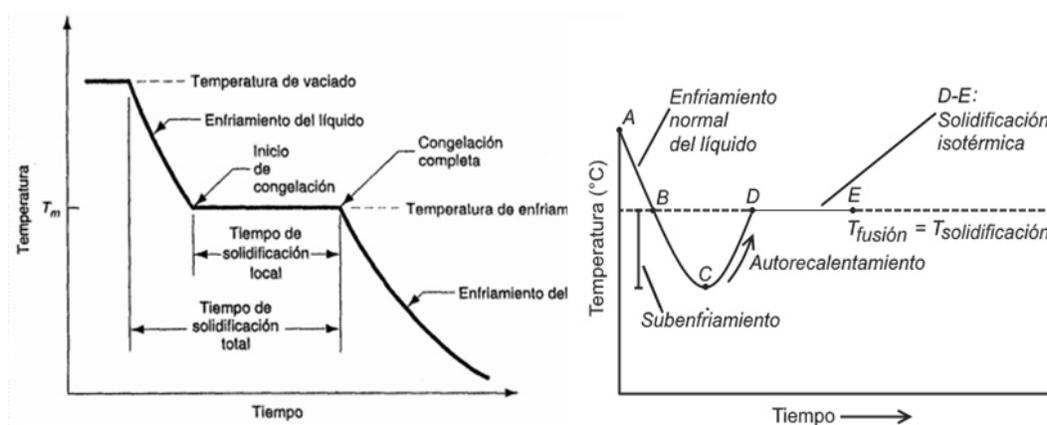


Figura 2.5. La relación entre EDS y el tiempo de solidificación (t_s) y velocidad de enfriamiento [17].

$$EDS = k(t_s)^n \quad (2.1)$$

$$EDS = m(V_s)^o \quad (2.2)$$

Donde k , m , n y o son constantes que dependen de la composición del metal o la aleación, $EDS = \mu\text{m}$, $t_s = \text{seg}$ y $V_s = ^\circ\text{C}/\text{seg}$ ⁽¹⁹⁾, ⁽²⁰⁾.

El tiempo requerido para la solidificación de una fundición simple puede ser calculada utilizando la regla de Chvorinov ^[24], ^[25]:

$$t_s = B \left(\frac{V}{A} \right)^2 \quad (2.3)$$

Donde, t_s es el tiempo de solidificación total, V es el volumen de la fundición, A es el área de la pieza fundida en contacto con el molde y B es una constante del molde (ecuación 2.3) ⁽²¹⁾.

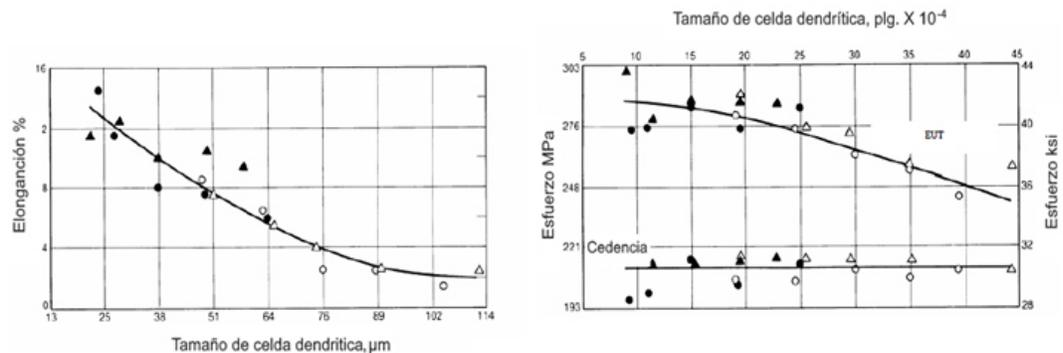


Figura 2.6. Variación del esfuerzo último y la elongación en función del tamaño de celda dendrítica ^[23].

2.2.4 Compuestos intermetálicos

La formación de compuestos intermetálicos en las aleaciones Al-Si influye en las propiedades de la aleación. El contenido de hierro en las aleaciones Al-Si es una de las causas de que existan propiedades mecánicas deficientes en una pieza vaciada, debido principalmente a la precipitación del compuesto intermetálicos Al_5FeSi o fase β . En la mayoría de los casos, el hierro (Fe) está presente como un elemento de impureza que se introduce en la aleación durante la manipulación y el vertido del aluminio fundido y se considera muy perjudicial para las propiedades mecánicas de las aleaciones de aluminio - silicio, debido a la formación de compuestos intermetálicos quebradizos.

El hierro también se introduce en piezas de fundición de aluminio mediante el uso de aluminio reciclado ^[17]. Cabe hacer notar que este compuesto intermetálico se forma a las velocidades de enfriamiento comúnmente utilizadas en vaciados en molde permanente y en moldes de arena. Este compuesto tiene forma de plaquetas delgadas o agujas puntiagudas, las cuales son muy duras y frágiles, lo que trae como consecuencia una disminución en la resistencia y ductilidad de las piezas vaciadas; además, este compuesto tiene una adhesión con la matriz relativamente baja. Con el fin de reducir el impacto negativo de las impurezas de hierro, se añade manganeso (Mn). Las adiciones de magnesio también se hacen a la aleación de aluminio A319 que se traduce en la formación de fases que mejoran la resistencia, maquinabilidad y aumentan la velocidad de endurecimiento por envejecimiento ^[17].

Tabla 2.8. Lista de las reacciones durante la solidificación la aleación de aluminio A319 que contiene 0,08% en peso de Mg ^[27].

Número de Reacción	Temperatura °C	Tipo de Reacción
1	611.8	Formación de α -Al red dendrítica
2	600.0 a 572.7	Precipitación de compuestos intermetálicos de hierro pre-eutético (α - $Al_{15}(Fe, Mn)_3Si_2$ y β - Al_5FeSi)
3	561.8	Precipitación de silicio eutético
4	550.0 a 541.0.	Precipitación de post-eutético β - Al_5FeSi
5	510	Precipitación de Al_2Cu
6	502.7	Precipitación de $Al_5Mg_8Cu_2Si_6$

Tabla 2.9. Lista de las reacciones durante la solidificación la aleación de aluminio A319 que contiene 0,6% en peso de Mg [27] [27].

Número de Reacción	Temperatura °C	Tipo de Reacción
1	608.2	Formación de α -Al red dendrítica
2	590	Precipitación de compuestos intermetálicos de hierro pre-eutéctico
3	546.3	Precipitación de silicio eutéctico
4	526.3	Precipitación de β -Al ₅ FeSi dentro Al ₈ Mg ₃ FeSi ₆
5	521.8	Precipitación de Mg ₂ Si
6	501.8	Precipitación de Al ₂ Cu ₂
7	491.8	Precipitación de Al ₅ Mg ₈ Cu ₂ Si ₆

2.2.5. Porosidad

La porosidad es un defecto típico que aparece como una red de pequeñas cavidades vacías distribuidas o repartidas en toda la región de la fundición. Se considera una característica indeseable debido a que degrada ciertas propiedades importantes, principalmente la resistencia a la tensión y la elongación [11]. La porosidad en las aleaciones de aluminio se asocia a porosidad por hidrógeno y porosidad por contracción [17].

La porosidad en la fundición de aluminio es irregular debido a combinación de los dos métodos mencionados anteriormente, porosidad gaseosa y porosidad por contracción, sin embargo es posible determinar el origen de ciertos poros, basados en su distribución y en aspectos de su morfología, así como su localización en la pieza. Los poros gaseosos usualmente tienen forma esférica, mientras que los poros por contracción tienen normalmente forma más irregular y alargada.

2.2.5.1. Porosidad por contracción

Es la acumulación de pequeños poros de forma irregular, los cuales se forma en la pieza fundida como resultado de la contracción volumétrica al no haber afluencia del metal líquido. La porosidad por contracción es característica para aleaciones de amplio rango de solidificación (el punto en el cual la aleación, la misma que no solidifica a temperatura

constante sino en un intervalo de temperatura comprendido entre T líquido y T sólido, cristaliza), tiene forma esférica alargada e irregular, se presenta en grupos donde se distribuye en forma difusa, axial y loca.

2.2.5.2. Porosidad por hidrogeno

La porosidad uniformemente distribuida se debe, casi siempre, al hidrogeno, que se disuelve bien en el aluminio liquido mientras que en el sólido no se disuelve casi. El hidrogeno puede ser aportado por el material base, por el de aportación, por impurezas conteniendo agua situadas en los bordes de la soldadura o en el material de aportación, por vapores, por humedad atmosférica, por impurezas del gas protector o por impurezas en soporte (placa de asiento) del lecho de fusión.

Utilizar altas velocidades de enfriamiento y métodos de refinamiento de grano se puede lograr que la porosidad disminuya o por lo menos que se distribuya uniformemente en poros de menor volumen ^[11].

2.3. Tratamientos térmicos

Los tratamientos térmicos son cualquier operación de calentamiento y enfriamiento con el propósito de cambiar las propiedades mecánicas, la estructura metalúrgica o el estado de esfuerzos residuales de los metales y aleaciones. La microestructura en las aleaciones de aluminio para vaciado no es homogénea, debido a que los elementos de aleación e impurezas tienden a segregarse dentro de la estructura eutéctica. Estas aleaciones vaciadas se conocen como aleaciones tratables, donde se aplica los tratamientos térmicos con el fin de homogenizar, relajar esfuerzos residuales, mejorar la estabilidad dimensional y la maquinabilidad, además de optimizar resistencia, ductilidad, dureza y resistencia a la corrosión ^[28].

La homogenización es deseable para distribuir los elementos en la matriz y las propiedades en la pieza de vaciado sean uniformes. Los esfuerzos residuales se crean durante el enfriamiento desde temperaturas de solución y vaciado, calentando las piezas a una temperatura intermedia se pueden relevar los esfuerzos residuales [28].

2.3.1 Clasificación de tratamientos térmicos en aleaciones de aluminio

La Asociación del Aluminio ha establecido un sistema de designación para tratamientos básicos en aleaciones de aluminio por parte la Asociación del Aluminio. Se coloca la nomenclatura después de la aleación y separándolas por un guion (Tabla 2.10.) [29].

Tabla 2.10. Sistema de designación para tratamientos básicos en aleaciones de aluminio [29].

F	Estado bruto. Es el material tal como sale del proceso de fabricación.
O	Recocido. Se aplica a materiales ya sea de trabajo como de fundición que han sufrido un recocido completo.
O1	Recocido a elevada temperatura y enfriamiento lento.
O2	Sometido a tratamiento termomecánico.
O3	Homogeneizado. Esta designación se aplica a los alambrones y a las bandas de colada continua, que son sometidos a un tratamiento de difusión a alta temperatura.
W	Solución tratada térmicamente. Se aplica a materiales que después de recibir un tratamiento térmico quedan con una estructura inestable y sufren envejecimiento natural.
H	Estado de Trabajado. Viene con materiales a los que se ha realizado un endurecimiento por deformación.
H1	Endurecido por deformación hasta obtener el nivel deseado y sin tratamiento posterior
H2	Endurecido en exceso por deformación y recocido parcial para recuperar suavidad sin perder ductilidad.
H3	Acritud y estabilizado.
H4	Acritud y lacado o pintado. Son aleaciones endurecidas en frío y que pueden sufrir un cierto recocido en el tratamiento de curado de la capa de pintura o lacada. En ésta clasificación se usa un segundo dígito (en ocasiones es necesario un tercer dígito) que indica el grado de endurecimiento por deformación.
T1	Enfriado desde un proceso de fabricación realizado a una elevada temperatura y envejecido de forma natural.

T2	Enfriado desde un proceso de fabricación realizado a una alta temperatura, trabajado en frío y envejecido de forma natural.
T3	Solución tratada térmicamente, trabajada en frío y envejecida a temperatura ambiente hasta alcanzar una condición estable.
T4	Solución tratada térmicamente y envejecida a T_{amb} hasta alcanzar una condición estable. Es un tratamiento similar a T3 pero sin el trabajo en frío.
T5	Enfriado desde un proceso de fabricación a alta temperatura envejecida artificialmente.
T6	Solución tratada térmicamente y envejecida artificialmente. Son designados de esta forma los productos que después de un proceso de conformado a alta temperatura (moldeo o extrusión) no son endurecidos en frío sino que sufren un envejecimiento artificial
T7	Solución tratada térmicamente y sobreenvejecida para su completa estabilización.
T8	Térmicamente tratada por disolución, trabajada en frío y envejecida artificialmente.
T9	Solución tratada térmicamente, envejecida artificialmente y trabajada en frío.

En las aleaciones de aluminio forjado o vaciado el tratamiento térmico permite incrementar la resistencia mecánica y la dureza por medio del envejecido o endurecimiento por precipitación. Las etapas para realizar el tratamiento térmico en las aleaciones de aluminio termotratable son:

2.3.1.1. Tratamiento de Solubilización

Tratamiento de solubilización tiene por objetivo disolver por completo a los elementos de aleación, esto se realiza elevando la temperatura hasta obtener una fase simple. Considerando no calentar por encima de la línea de solidus porque podría haber sobrecalentamiento (fusión de componentes), así como no elevar la temperatura más allá de la línea del eutéctico.

El tiempo de permanencia del material a la temperatura de solubilización está en función de la microestructura antes del tratamiento térmico y de las dimensiones de la pieza, ya que esta puede variar desde 20 horas en piezas de masas grandes hasta segundos en láminas sumamente delgadas. La disolución depende del tamaño y distribución de los precipitados existentes.

El dejar la aleación por mucho tiempo a la temperatura de solubilización hace que el grano crezca, haciendo que ésta pierda propiedades mecánicas debido al aumento en tamaño de los grano.

2.3.1.2. Enfriamiento rápido

El enfriamiento rápido se relaciona con la rapidez con la que el material pierde temperatura desde el tratamiento de solución (típicamente entre 465 – 565 °C, para aleaciones de aluminio), hasta a temperatura ambiente se aplica después del tratamiento de solubilizado. Su objetivo principal es mantener la estructura en este caso de solubilidad completa, pero a temperatura ambiente estará en un estado metaestable o en este caso solución sólida sobresaturada (SSSS). El agua fría es muy útil para obtener velocidades de enfriamiento altas o adecuadas para piezas grandes. Sin embargo, el enfriamiento rápido en piezas delgadas genera esfuerzos residuales.

Estos esfuerzos residuales pueden reducirse con un enfriamiento más lento. Siendo posible en algunas aleaciones ser enfriadas con agua caliente o aire frío, lo que afecta al envejecimiento posterior. Se debe mantener un balance entre una rapidez de enfriamiento suficientemente alta (para retener la mayoría de los elementos y compuestos en solución) y minimizar los esfuerzos residuales y la distorsión en las piezas.

2.3.1.3. Tratamiento de envejecido o endurecimiento por precipitación

El tratamiento térmico de envejecido consiste en mantener a cierta temperatura durante un tiempo para que precipiten los elementos de aleación. La velocidad de crecimiento es controlada por el fenómeno de difusión y se puede obtener apropiadamente por la ley de Fick. Hay dos clases de envejecido, el envejecido natural, que es el envejecido que sufren ciertas aleaciones a temperatura ambiente, y el envejecido artificial que es el que sufren la mayoría de las aleaciones y que es provocado intencionalmente por un equipo externo, como es el caso de un horno.

Las temperaturas y los tiempos de envejecimiento dependen de cada aleación en particular, y de hecho son menos críticos que los de solubilización. El objetivo de este tratamiento es producir un tamaño óptimo y distribución uniforme de precipitado, esto debido a que el tamaño forma y distribución del precipitado además de estar en función del tiempo y temperatura del tratamiento, gobiernan las propiedades de la aleación. Y todo esto está afectado por el estado inicial de la microestructura, esto es su historia termomecánica.

2.4. Propiedades Mecánicas

Las propiedades mecánicas de un material están basadas, principalmente, en el comportamiento que muestra ante la aplicación de algún tipo de carga; dicho comportamiento, generalmente se manifiesta mediante una deformación del material previa a una posible fractura. Existe dos tipos básicos de deformación: elástica y plástica. Todas las propiedades físicas de los metales están controladas por la estructura atómica y la microestructura del material. La experiencia muestra que la deformación elástica y plástica pueden tener lugar al mismo tiempo.

En la selección de un material, se debe de tener en cuenta sus propiedades a las condiciones funcionales requeridas por el componente. Se debe determinar las características más importantes que debe de poseer el material, como: resistencia, rigidez, ductilidad, si estará sometido a la aplicación de una gran fuerza, o a una fuerza súbita intensa, a elevada temperatura, a condiciones severas de abrasión, etc.

Existen cinco tipos primarios de cargas: tensión, compresión, corte directo, torsión y flexión. Para poder determinar las propiedades de un material se realizan ensayos de muestras en un laboratorio. Los ensayos pueden clasificarse en tres grupos: Ensayo elástico, dinámico y de impacto. Los ensayos más importantes y frecuentemente empleados, son los ensayos de tensión y compresión. A continuación se muestra algunas propiedades típicas de la aleación A319 (Tabla 2.11.) ^[30].

Tabla 2.11. Propiedades típicas de la aleación A319 [30].

Propiedades típicas de la aleación A319	
Esfuerzo de tensión	185 MPa
Esfuerzo de cedencia	125 MPa
% de elongación	2.0
Dureza Brinell	70
Esfuerzo de corte	150 MPa
Esfuerzo de fatiga	70 MPa
Razón de Poisson	0.33
Modulo elástico	74 GPa a tensión - 28 GPa a corte
Densidad	2.79 gr/cm ³ a 20°C
Temperatura de líquidos	600°C
Temperatura de sólidos	515°C
Conductividad térmica	109 W/m °K
Resistividad eléctrica	63.9 nΩ-m a 20°C

Los datos que se obtienen en la prueba de tensión se grafican como curvas de esfuerzo-deformación. La forma de la curva esfuerzo-deformación unitaria dependerá del material que se prueba, la historia de su proceso y de la temperatura a la que se le realiza la prueba. Esta región elástica termina en el límite proporcional donde termina la linealidad. Eventualmente hay incrementos de elongación sin incremento apreciable en la carga aplicada, (referido como el punto de fluencia, si el esfuerzo se incrementa otra vez con una deformación unitaria adicional). El pico de la curva indica el máximo esfuerzo y es llamada "resistencia ultima". Debajo de este punto la curva desciende hasta el punto de fractura. Mientras que el esfuerzo real o verdadero continúa incrementándose por arriba de la "resistencia ultima", la curva indica los esfuerzos basados en el área de la sección transversal original (Figura 2.7.).

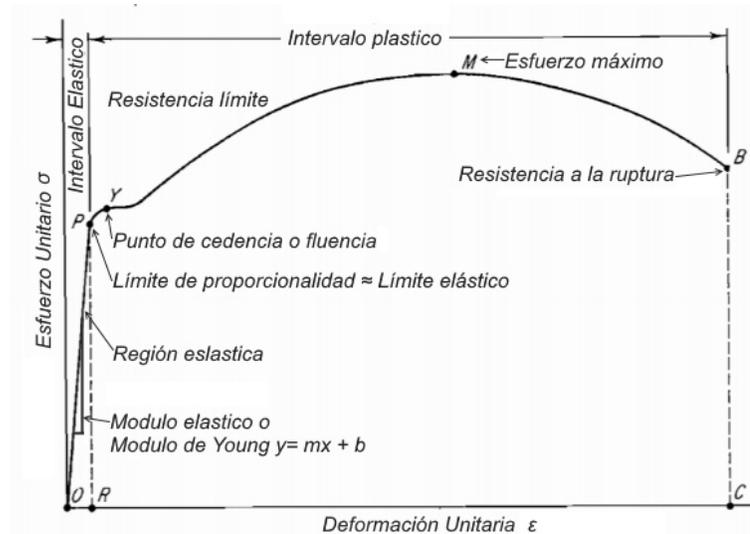


Figura 2.7. Curva esfuerzo-deformación unitaria.

2.4.1. Ley de Hooke.

Robert Hooke descubrió la relación entre esfuerzo y deformación unitaria. Más tarde Thomas Young determinó las constantes elásticas para varios materiales en un ensayo de tensión; que cuando la multiplicamos por la deformación unitaria es igual al esfuerzo resultante. Estas constantes son conocidas como módulos de Young o módulos de elasticidad (ecuación 2.4) ^[31].

$$\sigma = E\epsilon \quad (2.4)$$

Donde:

ϵ = deformación unitaria axial (mm/mm)

E = módulo de Young (kg/mm^2)

L_o = longitud unitaria (mm)

ΔL = cambio de longitud (mm)

De donde:

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{P}{A} \quad (2.5)$$

Entonces:

$$\sigma = E \left(\frac{\Delta L}{L_0} \right) = E\varepsilon \quad (2.6)$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \left(\frac{P}{A} \right) / \left(\frac{\Delta L}{L_0} \right) \quad (2.7)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \left(\frac{P}{A} \right) / E \quad (2.8)$$

Nótese que la Ley de Hooke, y el Módulo de Young, son válidos solamente para carga de tensión uniaxial, dentro de la región elástica de la curva esfuerzo deformación unitaria.

Sin embargo; para los metales más comunes en ingeniería, cargados uniaxialmente a compresión resulta una variación despreciable de "E" de la obtenida en tensión, Hablando prácticamente.

$$E \text{ Tensión} = E \text{ Compresión}$$

Cuando toma lugar una deformación en un cuerpo sólido bajo la acción de carga axial, no solo hay cambio de longitud axial sino también lateral o cambio de dimensión normal. Simeón Poisson cuantificó esta relación por medio de la razón de deformación unitaria lateral, a la deformación unitaria axial (ecuación 2.9).

$$m = \frac{-\varepsilon L}{\varepsilon A} \quad (2.9)$$

Donde:

m = Razón de Poisson

ε_L = Elongamiento Lateral (mm/mm)

ε_A = Elongamiento Axial (mm/mm)

El rango de valores de la "razón de Poisson" es desde 0.3 a 0.7. Una comparación relativa entre esfuerzo y deformación unitaria, puede ser hecha de un cuerpo cargado uniaxialmente (a tensión).

2.5. Esfuerzos residuales

Los esfuerzos residuales se pueden definir como los esfuerzos que quedan en un material, independientemente de cualquier fuerza externa, o bien, como los esfuerzos que permanecen en un material después de procesos de manufactura en ausencia de cargas externas y/o gradientes térmicos [32]. En los esfuerzos residuales hay dos componentes a tener en cuenta: tensión y compresión. Los esfuerzos residuales en tensión son por lo general indeseables debido a que reducen la resistencia a la fatiga y a la fractura de zonas críticas. Los esfuerzos residuales en compresión, suelen ser beneficiosos ya que impiden la originación y la propagación de grietas de fatiga y aumentan la resistencia al desgaste y a la corrosión. Los esfuerzos residuales pueden ser definidos ya sea como macro o micro-esfuerzos y ambos pueden estar presentes en un componente en un momento dado:

- Tipo I: Macro esfuerzos residual, se desarrollan en el cuerpo de un componente en una escala más grande que el tamaño de grano del material.
- Tipo II: Micro esfuerzos residuales, varían en la escala de un grano individual.
- Tipo III: Mico esfuerzos residuales Micro, existen dentro de un grano, esencialmente como resultado de la presencia de las dislocaciones y otros defectos cristalinos.

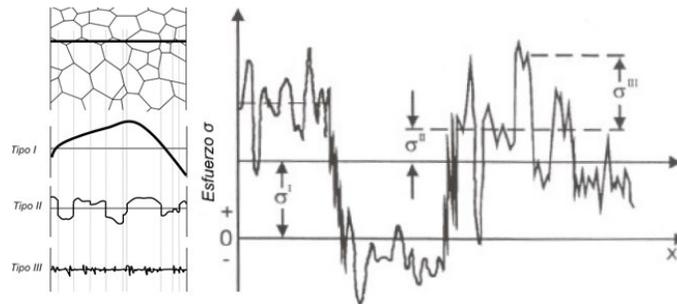


Figura 2.8. Clasificación de esfuerzo-residuales.

2.5.1. Clasificación del origen de esfuerzos

En la literatura se clasifica los esfuerzos residuales debido a que los originan [32], [33].

- Deformación plástica heterogénea.
- Cambios de fase.
- Gradientes térmicos

2.5.1.1. Deformación heterogénea

Los esfuerzos residuales pueden ser inducidos en las capas superficiales del material al sufrir algún tipo de compactación o producidos por cargas de servicio, lo que conduce a la deformación plástica no homogénea en la pieza o muestra. En este caso en particular no hay un calentamiento significativo de la superficie del componente, y los esfuerzos residuales son de naturaleza compresiva, como es el caso de los procedimientos de granallado, que inducen esfuerzos residuales compresivos en la superficie del material tratado [34].

Por otro lado, el maquinado de monobloques de aluminio es un ejemplo donde se observa tanto el flujo plástico como los cambios de temperatura. Si durante el proceso de

maquinado, recibe demasiado calor, el tamaño cambia y se genera automáticamente una conicidad conforme el monobloque se expande con el calor.

Esta expansión sería relevada por el flujo plástico en la superficie del material, provocado por las herramientas de corte. Si la herramienta de corte recibe demasiado calor, el filo cortante se romperá rápidamente, en dirección de la zona de corte hacia algún tipo de sistema de enfriamiento. Igualmente, la mayor parte del calor se disipa en las virutas, que actúan como un absorbente de calor desechable. Esta transferencia de calor se manifiesta por el cambio en el calor de la viruta conforme el calentamiento hace que las virutas se oxiden. Al removerse el calor, debido al enfriamiento del refrigerante, la superficie del material se contrae, por tanto el flujo plástico y la contracción debido al calentamiento mecánico podrían ocasionar heterogeneidades en las zonas maquinadas, resultando en esfuerzos residuales en el material ^[35].

2.5.1.2. Cambios de fase

Con respecto a los cambios de fase, para materiales que sufren un cambio en el volumen, debido a su transformación estructural, por ejemplo el acero, donde la austenita cristaliza en el sistema cúbico centrado en las caras (f.c.c.), la cual es una estructura más densa que las otras estructuras en las cuales se puede transformar. La expansión está relacionada a la composición del acero.

La Figura 2.10., muestra la expansión del parámetro de red de la austenita al incrementarse el contenido de carbón, el cual es aproximadamente 0.002 mm/mm con 0.25%C y de 0.007 mm/mm con 1.2%C ^[36]. La fracción de incremento en el tamaño de la austenita, al convertirse a martensita es de 0.014 mm/mm para las composiciones eutécticas. Estos valores ilustran el efecto del contenido de carbón y las transformaciones del acero en la distorsión, la cual está ligada con los cambios dimensionales y los esfuerzos residuales. Por tanto, al haber una distribución (difícilmente homogénea) de las diferentes fases, habrá de considerarse la aparición de esfuerzos residuales en dichos materiales.

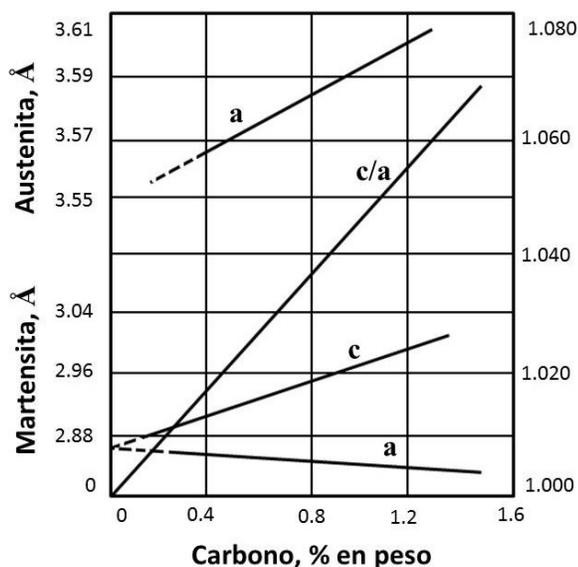


Figura 2.9. Contenido de carbono contra los parámetros de red en la austenita (retenida) y la martensita a temperatura ambiente, a en la parte superior de la gráfica es el parámetro de red de la austenita (f.c.c.), a y c en la parte baja de la gráfica con los parámetros de red de la martensita. Se presenta la razón c/a para la martensita como una función del contenido de carbono [36].

2.5.1.3. Gradientes térmicos

Se forman típicamente durante el enfriamiento después del tratamiento de térmico, que dan como resultado en el desarrollo de esfuerzos residual, debido a incompatibilidades entre regiones vecinas del material. Cuando un material es calentado o enfriado, las regiones individuales del material se expanden o contraen libremente por una cantidad proporcional a $\alpha\Delta T$, donde α es el coeficiente de expansión térmica del material y ΔT es la variación de la temperatura [37], [38].

La incompatibilidad entre regiones vecinas, es lo que restringe los cambios dimensionales en cada región y causa la generación de un campo de deformación elástica para mantener la continuidad del material [37], [38]. Típicamente, sin embargo, cuando se equilibra la temperatura del componente, las tensiones térmicas desaparecen, a menos que la plasticidad localizada induce inadaptados permanentes dentro del componente [39]. Realmente, el problema de los esfuerzos residuales es muy complejo, para simplificarlo,

considere solo el efecto del gradiente término. Bajo el efecto del tamaño y la masa, previamente se mostró que durante el templado, la superficie se enfría más rápido que el interior. Durante temple hay dos tipos principales de tensiones, esfuerzos térmicos y tensiones de transformación. Los primeros son consecuencia de las diferentes velocidades de enfriamiento que experimentan la superficie y el núcleo, mientras que las tensiones de transformación aparecen debido a los cambios de volumen cuando se transforman las fases. Esto causa un gradiente de temperatura a través de la sección transversal de la pieza o una diferencia de temperatura entre a superficie y el centro.

Por ejemplo, examinemos los puentes entre cilindros de un motor de combustión interna. Para mayor resistencia al desgaste y bajos costos de producción, los monobloque de aluminio requieren la inserción de camisas de hierro gris precalentados previos a la colada del aluminio para evitar un choque térmico. Casi todos los sólidos se expanden conforme se calientan, y se contraen conforme se enfrían. Esto quiere decir que cuando el aluminio empieza la solidificación, la región que está en circundante a las camisas de hierro gris se enfriara a mayor velocidad debido a su coeficiente de expansión térmica, debiéndose contraer mucho más que las camisa; sin embargo, como las camisas de hierro gris y el aluminio están en contacto entre sí, las camisas de hierro gris prevendrá al aluminio de contraerse tanto como debe.

Por tanto, se elongará el aluminio circundante a las camisas, poniéndose en tensión, mientras que las camisas, a su vez, estarán en compresión; como ya se ha mencionado debido a la gran diferencia en el coeficiente de expansión térmica entre el aluminio ($2,4 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$) y el hierro gris ($1,5 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$). La magnitud aproximada de este esfuerzo térmico puede calcularse mediante la fórmula siguiente (ecuación 2.10):

$$\sigma_t = \alpha E \Delta T \quad (2.10)$$

Donde:

σ_t = esfuerzo térmico, (kg/mm^2)

α = coeficiente de expansión lineal, ($mm/mm\ ^\circ C$)

E = módulo de Young, (kg/mm^2)

ΔT = diferencial en temperatura, $^\circ C$

Este esfuerzo total debe distribuirse ahora entre las camisas de hierro gris y el aluminio circundante, y el esfuerzo promedio será inversamente proporcional al área disponible para aguantar este esfuerzo. Además, considerar que estos esfuerzos residuales generados a partir de los gradientes térmicos varían gradualmente en magnitud con la profundidad de la superficie de la muestra.

2.5.2. Efectos causados por presencia de esfuerzos residuales

Siguiendo con el ejemplo de los puentes entre cilindros. Las camisas de hierro gris causan enfriamiento no uniforme a lo largo del cilindro, como resultado se tiene una microestructura no homogénea y variación en propiedades mecánicas. Los efectos causados por presencia de esfuerzos residuales en tensión son por lo general indeseables debido a que reducen la resistencia a la fatiga y a la fractura. Presentándose agrietamientos tanto en el aluminio como en los cilindros de hierro gris, así como su distorsión dimensional permanente en los cilindros cuando se expone a condiciones de servicio.

La distorsión de los cilindros evita un sellado efectivo de la cámara de combustión y provoca mala relación de la mezcla aire-combustible durante el funcionamiento del motor. Este fenómeno se llama "blow by" (Figura 2.10.).

Esto afecta la eficiencia termodinámica del motor, siendo de gran importancia para cumplir con las estrictas legislaciones de los gobiernos, respecto a emisiones.

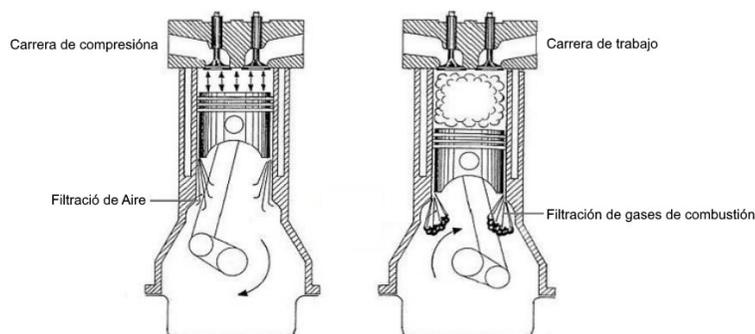


Figura 2.10. Sección de cilindro del motor que ilustra el fenómeno de escape de gases durante la operación. Algunos métodos de medición de esfuerzos residuales.

Durante las últimas cinco décadas se han desarrollado numerosos métodos para medir esfuerzos residuales de diferentes componentes [33], [40]. Aunque hay diversas formas de distinguir determinados métodos de medición de esfuerzos residuales, parece adecuada una división de acuerdo a si la prueba es destructiva (semi-destructiva), o bien No-destructivas.

2.5.3. Métodos de medición de esfuerzos residuales

Se han desarrollado numerosos métodos para medir esfuerzos residuales de diferentes componentes durante las últimas cinco décadas [33], [40]. Aunque hay diversas formas de distinguir determinados métodos de medición de esfuerzos de tipo I, parece adecuada una división de acuerdo a si la prueba es destructiva, semi-destructiva, o bien no-destructivas (Figura 2.11.).

Los métodos destructivos y semi-destructivos (métodos mecánicos), particularmente miden la deformación presente en el material como resultado de un relevado de esfuerzos total o parcialmente mediante la eliminación de material.

El método de seccionado (slitting method), hole-drilling, ring-core y la técnica deep hole son los principales métodos destructivos y semi-destructivos utilizados para medir esfuerzos residuales en materiales metálicos. Los métodos de medición de esfuerzos residuales no destructivos tienen la ventaja obvia de la conservación de muestras, y son

particularmente útiles para el control de calidad de la producción y para la medición de muestras costosas. Sin embargo, estos métodos requieren comúnmente calibraciones detalladas sobre el material. Los métodos no-destructivos incluyen rayos-X, difracción de neutrones, métodos ultrasónicos y métodos magnéticos. Estas técnicas miden algún parámetro estructural que pueda relacionarse a la deformación, como pueden ser los parámetros de red o de estructura atómica.

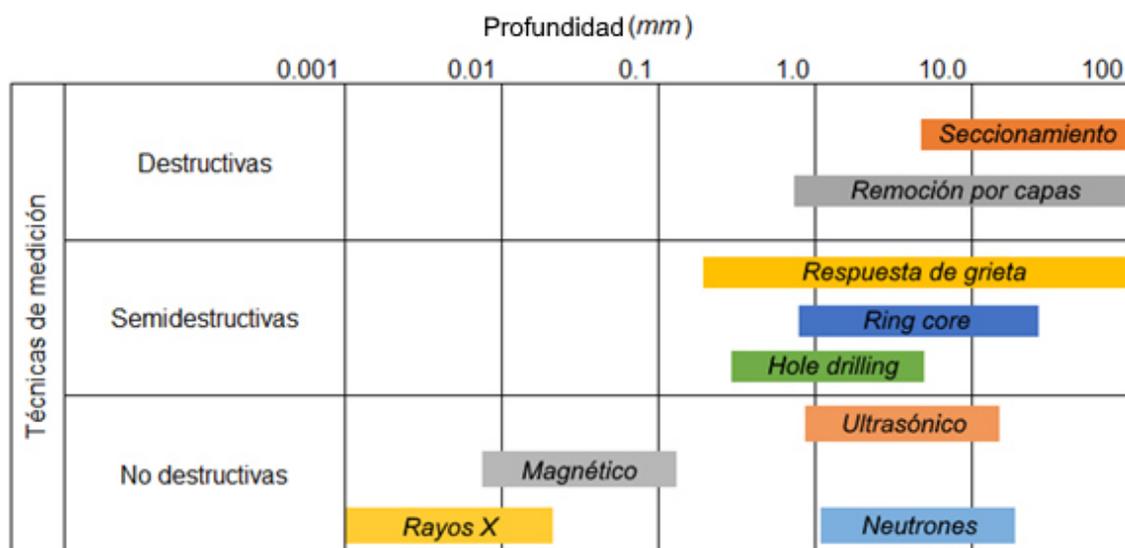


Figura 2.11. Técnicas de medición de esfuerzos residuales.

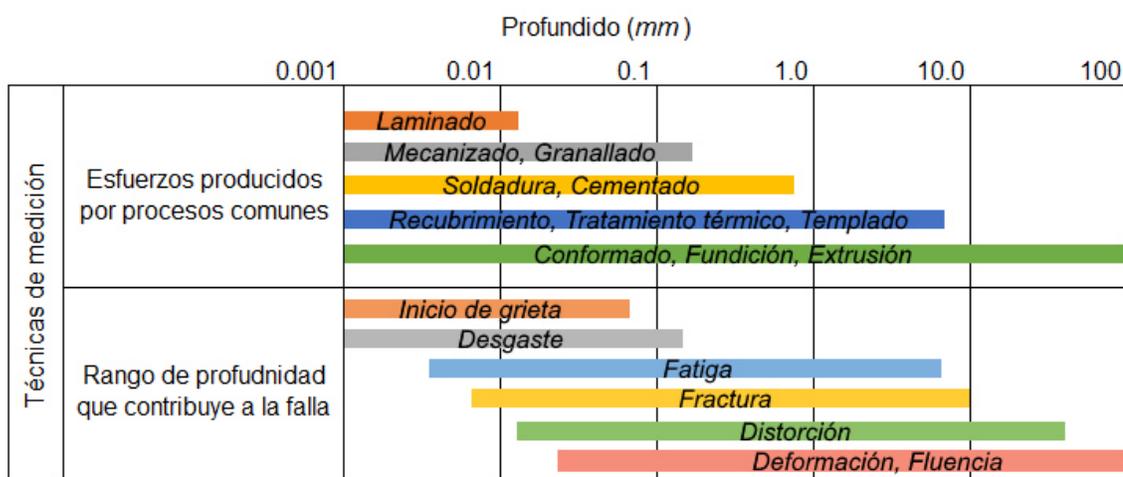


Figura 2.12. Esfuerzos producidos por procesos y rangos de profundidad que contribuyen a la falla del material.

2.5.3.1. Hole drilling (HD)

Hole-drilling es mencionado como una técnica relativamente simple y rápida; es de los métodos semi-destructivos de evaluación de esfuerzos residuales que proveen la distribución de esfuerzos residuales (dirección, magnitud y sentido) alrededor del espesor evaluado (3-D). Se menciona que tiene la ventaja de tener buena exactitud y confiabilidad, cabe señalar que es el único método estandarizado por la ASTM (E837) ^[41]. El daño en la muestra (que puede ser tolerable o bien es reparable) está localizado en un pequeño agujero taladrado de aproximadamente 1.8 mm de diámetro, en el lugar donde se requieren medir los esfuerzos residuales. Debido al taladrado del agujero los esfuerzos residuales contenidos en la pieza son relevados y las correspondientes deformaciones en la superficie son medidas utilizando de forma conveniente, rosetas de deformación (strain gages) pegados alrededor del agujero en la superficie del material ^[42]. Una vez medidas las deformaciones alrededor del agujero, los esfuerzos residuales son calculados utilizando las constantes de calibración derivadas de las rosetas de deformación, así como los procedimientos de análisis para el tipo de esfuerzos esperados, como puede ser un algoritmo o software apropiado ^[43].

Estos métodos, HD y Ring-Core (RC), en contraste a otras técnicas de medición de esfuerzos residuales son aplicables a todos los grupos de materiales que se consideren isotrópicos y sean maquinables. Para evitar el flujo plástico localizado debido a la concentración de esfuerzos en el agujero durante el maquinado, el máximo valor de los esfuerzos residuales no puede exceder el 60% del esfuerzo de cedencia del material. La resolución de la técnica depende tanto del equipo utilizado como del área (diámetro) del agujero. La profundidad analizable no debe exceder la mitad del diámetro del agujero ^[44]. Cada uno de los pasos para la implementación del método HD ha sido explicado por el grupo Vishay ^[45]. El maquinado del agujero para la medición de esfuerzos residuales debe ser realizado con mucho cuidado para evitar introducir errores de medición. Hay tres principales fuentes de error:

La introducción de esfuerzos de maquinado (flujo plástico heterogéneo), la forma no-cilíndrica del agujero (ovalaciones), y la excentricidad (fuera de centro). Aun así es el único método aceptado como un método estándar por la ASTM ^[46], ^[47], ^[48]. Para evitar los esfuerzos de maquinado que pudieran causar errores al incrementar los esfuerzos residuales, se han implementado equipos que modifican los parámetros del maquinado, reduciendo el flujo plástico durante el taladrado, tal es el caso del Hole-drilling HS alta velocidad (HS = High speed) ^[49].

Este método aventaja por una mejorada exactitud, además es ideal para materiales de alta dureza y alta tenacidad, donde hay severo desgaste. Aún con éste método, el desgaste de las herramientas de maquinado (taladros) provocan fallas que introducen errores en la medición. Procesos de maquinados del tipo de descargas eléctricas (EDM = Electrical discharge machining) han probado ser más eficientes al maquinar agujeros de alta calidad ^[50], ^[51] aun así tampoco están exentos de introducir deformación plástica que conlleve a errores en las mediciones. Se ha buscado reducir los errores de maquinado al introducir un factor de calibración debido a los esfuerzos inducidos por maquinación. Para realizar este tipo de calibración es necesario analizar por separado cada operación de maquinado, así como el material a probar, de esta manera se obtiene un factor de corrección, dependiendo del material y las variables de maquinado utilizadas, para medir con mayor exactitud los esfuerzos residuales en cada caso ^[52], ^[53]. Esta implementación involucra un período de desarrollo en el cual se evalúen los diversos parámetros involucrados en la medición, tanto del material a probar, como de las condiciones frontera, esto es, los valores límites, de esfuerzos residuales, dentro de los cuales la calidad del producto no tiene afectación.

En el desarrollo de la prueba HD, los esfuerzos residuales no son uniformes con la profundidad, por esta razón se han utilizado maquinados de inserción progresiva, taladrando en series de pequeñas distancias. Lo que se ha observado en estos métodos es que al reducir la profundidad de cada desplazamiento, se incrementa la sensibilidad del método ^[54], ^[55].

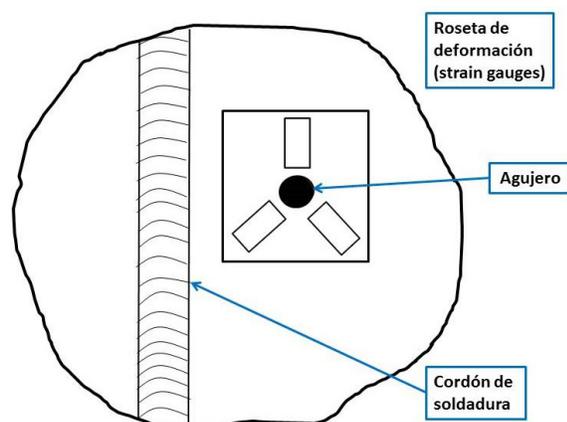


Figura 2.13. Diagrama donde se ejemplifica el uso de la técnica Hole-drilling en aplicaciones de soldadura ^[42].

2.5.3.2. Método del seccionamiento

La técnica del seccionado (sectioning technique) es un método destructivo. Mide la deformación debida provocada por el relevado de esfuerzos residuales, ocurrido después de remover un fragmento de material de la muestra ^{[74],[75]} El método implica realizar un corte en una placa preparada, y efectuar mediciones de deformación antes y después del corte. Las mediciones de deformación se realizan utilizando rosetas de deformación, para medir deformación axial y/o curvatura. Excelentes mediciones de esfuerzos residuales se mencionan en la literatura ^{[76],[77]}.

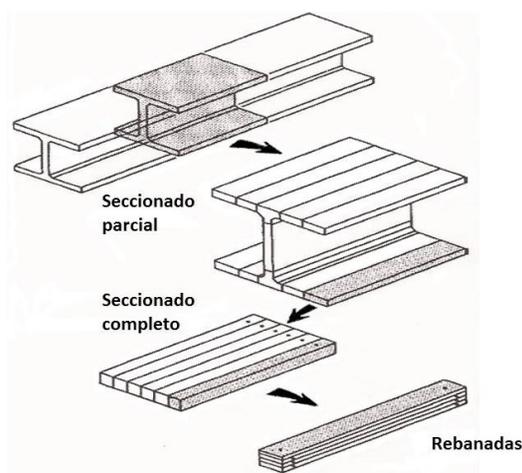


Figura 2.14. Método del seccionamiento ^[75].

2.5.3.3. Difracción de Rayos-x

La técnica de difracción de rayos-x aprovecha el principio de que cuando un metal es sometido a esfuerzos residuales, las deformaciones elásticas resultantes provocan un cambio en el espaciamiento entre los planos atómicos en las estructuras cristalinas. La difracción de rayos-x puede medir directamente el espaciamiento interatómico, de la obtención de este valor los esfuerzos residuales pueden ser obtenidos ^{[56], [57]}. La medición de esfuerzos residuales mediante difracción de rayos-x es aplicable a materiales cristalinos de grano relativamente fino, los cuales producen difracción con cierta orientación de la muestra superficial. Debido a las dificultades que ofrecen los difractómetros portátiles para realizar mediciones al aire libre ^[58] la mayoría de las mediciones por este método se realizan en laboratorios, por lo tanto, se requiere el corte y preparación de las piezas a inspeccionar, lo que provoca que se convierta comúnmente en una prueba destructiva.

Para el caso de materiales nano-estructurados no es tan sencillo el uso de técnicas de difracción debido a la dificultad de analizar la forma de la cresta de difracción en dichos materiales. La rapidez de la medición depende de algunos factores tales como el tipo de material analizado, la fuente de rayos-x, así como el grado de exactitud requerido. La difracción de rayos-x al igual que los demás métodos de difracción es un método costoso.

2.5.3.4. Difracción de neutrones

Aplica el mismo principio que el método de difracción de Rayos-X, al medir las deformaciones elásticas en un material policristalino, causadas por un cambio en el desplazamiento de los planos atómicos. La ventaja de este método con respecto a la técnica de rayos-x radica en el mayor poder de penetración. La difracción de neutrones es capaz de penetrar algunos centímetros en el interior del material, evaluando esfuerzos residuales internos en el material. Es posible medir esfuerzos residuales cercanos a la superficie, desde 0.2 mm de profundidad hasta 100 mm en aluminio, y 25 mm en acero ^[32]. El equipo de difracción de neutrones es aún más costoso que el equipo de difracción de rayos-X, por lo tanto se considera inadecuado para las inspecciones rutinarias de proceso ^[59].

2.5.3.5. Galgas extensométricas

La galga extensométrica es un sensor (transductor pasivo) que varía su resistencia eléctrica en función de la deformación que sufre la superficie sobre la cual es pegada ^[60]. Inventado por los ingenieros Edward E. Simmons y Arthur C. Ruge en 1938, aunque el descubrimiento del principio en el cual se basa el funcionamiento de la galga fue en 1856 por Lord Kelvin, que aplicó una carga de tensión a alambres de cobre y de hierro y notó que la resistencia se incrementaba con la deformación aplicada al alambre. Finalmente, Lord Kelvin aplicó un puente de Wheatstone para medir el cambio de resistencia ^[60].

El cambio de longitud que resulta de aplicar una fuerza (F) a una pieza unidimensional (siempre y cuando no se supere su límite elástico, está dado por la ley de Hooke ^[31] (ecuación 2.11).

$$\sigma = \frac{F}{A} = E\varepsilon = E \frac{dl}{l} \quad (2.11)$$

Donde:

E= Modulo de elasticidad del material (Módulo de Young)

σ = Esfuerzo uniaxial.

ε =Deformación unitaria.

Para entender mejor el funcionamiento de una galga se puede considerar como un alambre metálico, cuya resistencia es modelada con la ecuación 2.12 ^[61].

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (2.12)$$

Donde:

R = Resistencia del conductor (Ω)

l =Longitud del conductor (m)

A =Área de la sección transversal (m^2)

ρ =Resistividad (Ωm)

Por esta razón, cuando el alambre de la galga se estira ligeramente, la resistencia (R) se incrementará debido a que la longitud (l) aumenta y el área (A) disminuye. Por otra parte; si el alambre se comprime ligeramente, (R) disminuye por que la longitud (l) se decrementa y el área (A) de la sección transversal aumenta. En resumen, la resistencia del alambre depende de la longitud y área de la sección transversal del mismo.

La longitud del objeto depende la fuerza aplicada, por lo cual el resultado final es que la resistencia del alambre depende de la fuerza aplicada al objeto. Midiendo el cambio de resistencia se puede medir la fuerza aplicada.

La resistencia eléctrica de un conductor de longitud (l), sección transversal (A) y resistividad (ρ), está dada por (ecuación 2.13):

$$\sigma = \frac{F}{A} = E\varepsilon = E \frac{\Delta l}{l} \quad (2.13)$$

Donde:

σ =esfuerzo aplicado al objeto (N/m²)

F=fuerza, tensión, peso, carga (N)

A=área transversal de la estructura (m²)

E=módulo de elasticidad del material (N/m²)

ε =deformación unitaria

Δl = cambio en la longitud del objeto (m)

l=longitud inicial del objeto

La construcción de una galga extensométrica involucra la unión de sus tres partes principales, las cuales son: la rejilla, la base y las etiquetas (Figura 2.15.). La rejilla de la galga es la parte metálica que cambia su resistencia en función de la compresión o tensión, la base es el soporte de la rejilla y es fabricada de diferentes aislantes, por último, la etiqueta de la galga sirve para conectar la galga extensométrica con el circuito acondicionador de señal. Para realizar mediciones, este transductor se pega sobre la superficie del objeto bajo estudio (metal, madera, concreto, plástico, etc.), cuando el objeto se comprime o expande, la longitud del hilo metálico cambia en la misma proporción y con ello la resistencia de la galga. Este efecto se usa para hacer la medición de diferentes parámetros, como son: vibración, torsión, flexión, compresión, tensión, pesos, etc. [62].

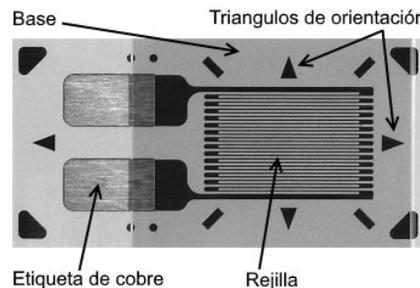


Figura 2.15. . Construcción de una Galga extensométrica (Micro-Measurements ® CEA-06-125UN-350).

❖ **Rejilla de la galga extensométrica**

Las galgas extensométricas tienen un alambrado en forma de rejilla. Para cumplir con los requerimientos de resistencia, se varía su longitud. Según la aplicación existen varios tipos de alambre para galgas con diferentes características con el propósito de mejorar el desempeño a muy altas o muy bajas temperaturas, aumentar la sensibilidad a la tensión o para tener mejor vida a la fatiga, existen varios tipos de aleaciones, siendo la más usada la aleación cobre níquel. (El espesor del es de 0.1 mm en el área de la rejilla).

❖ **Material de la base**

La base o portadora de la rejilla, es el material que se encuentra entre la superficie del objeto de estudio y la rejilla. Provee las siguientes funciones:

- Proporciona firmeza y soporte a la rejilla para el soldado de cables a las etiquetas.
- Provee una superficie manejable para el pegado de la galga en el objeto de estudio.
- Proporciona un aislamiento eléctrico entre la rejilla de la galga y el ovejero de estudio.

Los materiales de la base también llamados forros son de dos tipos: Polyimide y fibra de vidrio reforzado con epoxy-phenolic. Cada forro debe tener características térmicas similares a las de la aleación usada y la superficie sobre la cual va a ser adherida. Por esta razón las galgas se dividen en series, debido a que cada serie tiene sus propias características y áreas de aplicación.

❖ **Etiquetas de cobre**

Las etiquetas de cobre se utilizan para conectar la galga extensométrica con el circuito acondicionador de señal. Dependiendo la aplicación se integran un sistema acondicionador de señal para cubrir los requerimientos de éstas. Los cables que conectan el circuito acondicionador con la galga extensométrica deben de ser soldados sobre las etiquetas de cobre para garantizar una buena conducción de las variaciones de resistencia de la galga.

❖ **Triángulos de orientación**

La galga debe alinearse con las líneas de fuerza que presenta el objeto de estudio al aplicarse una carga sobre él. Una ubicación incorrecta de la galga implica tener errores en la medición del parámetro de estudio. Las galgas poseen cuatro pequeños triángulos para orientarlas correctamente sobre el objeto de estudio.

❖ **Tipos de Galgas extensométricas (células de carga)**

- Elementos elásticos
- Galgas extensométricas de resistencia eléctrica
- Galgas extensométricas de hoja
- Galgas extensométricas semiconductoras.
- Galgas extensométricas de capa delgada
- Galgas extensométricas de cable.

La Figura 2.15. Ilustra algunos tipos de la amplia variedad de láminas de galgas disponibles. Típicamente la longitud más usada está en el rango de 3 a 6 mm, con espesor de 0.03 a 0.07 mm ^[60].

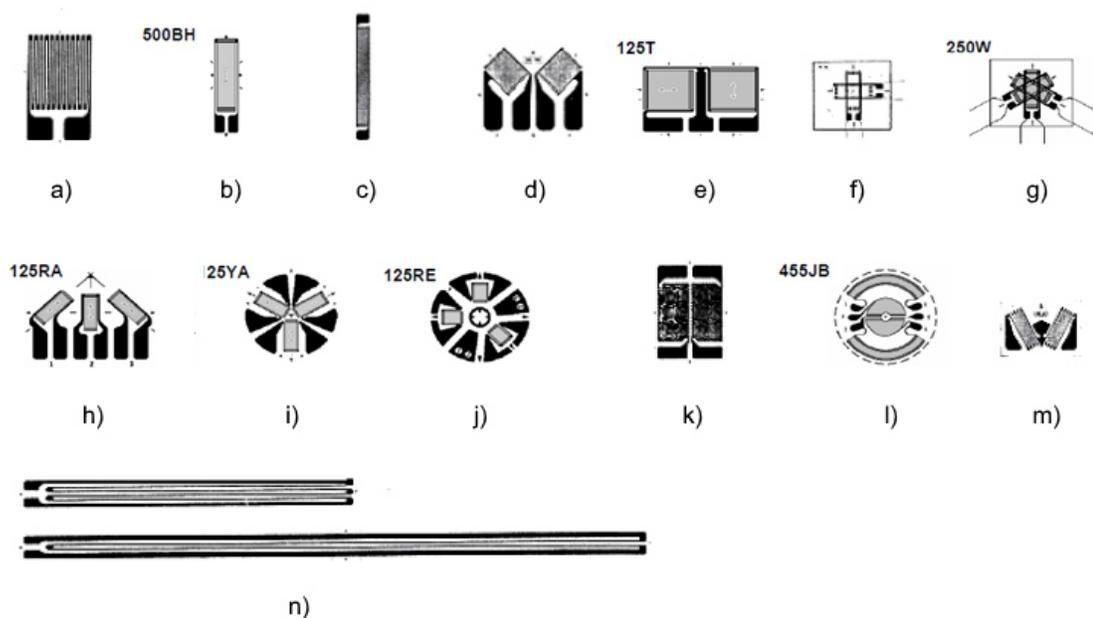


Figura 2.16. Diferentes configuraciones de galgas a) de un elemento, b) de un elemento, c) de un elemento, d) roseta de dos elementos, e) roseta de dos elementos, f) roseta empalmada de dos elementos, g) roseta de tres elementos, h) roseta de tres elementos, i) roseta de tres elementos, j) roseta de tres elementos galga, k) galga compartida, l) galga de diagrama, m) roseta de dos elementos, n) galga alargada de un elemento, o) arreglo lineal de una galga de tensión múltiple ^[60].

La galga modelo 40CBY, se usa para medir la tensión en superficies de concreto, ya que tiene la capacidad de medir cualquier fluctuación que ocurre en las partículas del cemento. La galga modelo 125RE se utiliza para determinar tensiones residuales. La deformación se define como el cambio en la longitud de un objeto como un porcentaje de su longitud original ^[61].

❖ Factor de la galga extensométrica

Cuando la gaga no presenta deformación, posee una resistencia nominal (R). Una figura de mérito usada para especificar la sensibilidad de la galga, es el factor de la gala (GF , *gage factor*). Es un parámetro adimensional definido como la unidad de cambio de la resistencia por unidad de cambio de longitud (ecuación 2.14).

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} \quad (2.14)$$

Donde:

GF = factor de la galga.

R = Resistencia nominal de la galga (Ω).

ΔR = Cambio en la resistencia de la galga (Ω).

l = Longitud inicial del objeto (m).

Δl = Cambio en la longitud del objeto (m).

Un factor de galga alto significa un cambio mayor de resistencia, ante un cambio pequeño de longitud, el cual es más fácil de medir que un cambio pequeño de resistencia. Por tal razón, para aplicaciones en mediciones en tensión o cargas mecánicas es preferible una lata sensibilidad.

En el mercado existen una gran cantidad y tipos de galgas extensométricas, esta variedad provoca que existan diferentes factores de galga, las cuales se seleccionan en función del tipo de material sobre el cual se va a colocar y la variable física a detectar.

❖ Parámetros para la selección de la galga extensométrica

Los criterios de selección de la galga involucran evaluar diferentes parámetros como son: variable física a estudiar (tensión, aceleración, desplazamiento etc.); superficie sobre la cual se va a pegar (metal, concreto, madera, plástico, etc.) y la temperatura de operación (medio ambiente o ambientes industriales). Ésta correcta selección garantiza el óptimo funcionamiento de la galga, además de reducir al mínimo el costo de la instalación de la galga.

Para mediciones de tensión, las características de funcionamiento e instalación de una galga son afectadas por los siguientes parámetros:

- Sensibilidad a la tensión de la rejilla
- Longitud de la galga
- Modelo de la galga
- Resistencia de la galga

Tabla 2.12. Valores de factores de galgas y sensibilidad transversal^[63].

<i>Tipo de galga</i>	<i>Factor de galga</i>	<i>Sensibilidad transversal %</i>
EA-06-250BG-120	2.11	+0.4
EA-50-250BG-120	2.125	+0.9
WK-06-250BG-350	2.05	-3.4
WK-06-500AF-350	2.04	-9.2
WK-15-125AD-350	2.16	-1.9

Tabla 2.13. Sensibilidad a la tensión de algunos de los materiales utilizados para la construcción de galgas extensométricas^[63].

<i>Material</i>	<i>Nombre comercial</i>	<i>Sensibilidad a la tensión</i>
Cobre-níquel (55-45)	Constantan	+2.1
Níquel-cromo (80-20)	Nichrome V	+2.2
Níquel-cromo (75-20) más hierro y aluminio	Karma	2.1
Hierro-cromo-aluminio	Armour D	+2.2
Níquel-cromo-hierro-molibdeno (36-8-55.5-0.5)	Isoelastic	+3.5
Platino-tungsteno (92-8)	-	+4.0
Cobre-níquel-manganeso (84-4-12)	Manganin	+0.6
Níquel	-	-12.0
Hierro	-	+4.0

❖ Compensación de efectos térmicos

Una característica de los metales es dilatarse o contraerse en la medida que sufren variaciones de temperatura cuando la galga se instala sobre una superficie de un objeto metálico; lo cual se trasfiere a la galga y se puede interpretar mediciones erróneas. Para compensar los efectos térmicos en la galga debido a las variaciones de temperatura en el entorno de trabajo, se instala la galga adicional llamada galga pasiva. Esta galga se coloca en dirección perpendicular a la dirección de la tensión. En esta forma únicamente se tienen cambios de resistencia en la galga en función de las variaciones de temperatura existentes en el medio ambiente. La galga que detecta la tensión es llamada galga activa, ésta también varía su resistencia con la temperatura, pero la conectarse al módulo de acondicionamiento, estas variaciones son compensadas por la galga pasiva.

En la Figura 2.16., se muestra la forma en la cual se colocan las dos galgas. La galga activa varía en función de la tensión y a temperatura y la pasiva sólo en función de la temperatura. Cuando el sensor va a operar en un ambiente controlado, no se requiere instalarle la galga pasiva por que los cambios no son considerables.

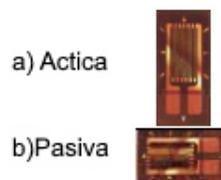


Figura 2.17. a) Galga extensométrica activa, b) Galga extensométrica pasiva.

❖ Acondicionamiento

Las mediciones de carga requieren detectar cambios muy pequeños de resistencia, el circuito de puente Wheatstone se usa predominantemente. La forma habitual de obtener una señal eléctrica como resultado de una medida empleando un puente de Wheatstone, es mediante el método de deflexión. En éste método, se mide la diferencia de voltaje entre ambas ramas o la corriente a través de un detector dispuesto en el brazo central.

Existen tres tipos de montajes básicos: con una, dos y cuatro galgas. El uso de múltiples medidores permite compensar los efectos no deseados, como componentes de temperatura y deformaciones específicas. En el circuito puente de la Figura 2.20., las cuatro resistencias representan medidores de deformación activos, la salida V_d está dada por (ecuación 2.15) [64].

$$V_d = \left[\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right] \quad (2.15)$$

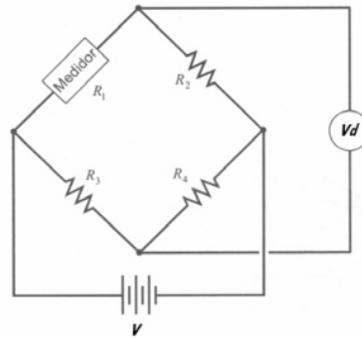


Figura 2.18. Puente de medida con una galga.

Suponemos que inicialmente los medidores de deformación están en estado de cero deformaciones, si se someten a deformaciones tal que las resistencias cambian a dR_i , e $i=1, 2, 3$ y 4 , el cambio de voltaje de salida será (ecuación 2.16):

$$dV_d = V \left[\sum_{i=1}^{i=4} \frac{\partial V_d}{\partial R_i} dR_i \right] \quad (2.16)$$

Evaluando las derivadas parciales obtenemos (ecuación 2.17):

$$dV_d = V \left[\frac{R_2 dR_1 - R_1 dR_2}{(R_1 + R_2)^2} + \frac{R_3 dR_4 - R_4 dR_3}{(R_3 + R_4)^2} \right] \quad (2.17)$$

Suponiendo $dR_i \ll R_i$, De las ecuaciones (16), (17), $dR_i = R_i \varepsilon_i GF_i$ y dV_d puede determinarse el cambio de salida de voltaje δV_d así (ecuación 2.18):

$$\delta V_d = V \left[\frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} (\varepsilon_1 GF_1 - \varepsilon_2 GF_2) + \frac{R_3 R_4}{(R_3 + R_4)^2} (\varepsilon_4 GF_4 - \varepsilon_3 GF_3) \right] \quad (2.18)$$

Es posible conseguir medidores tal que las resistencias sean iguales y sus factores GF también lo sean, por tanto (ecuación 2.19):

$$\frac{\delta V_d}{V} = \frac{GF}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_4 - \varepsilon_3) \quad (2.19)$$

En el caso de un solo medidor tenemos (ecuación 2.20):

$$\frac{\delta V_d}{V} = \frac{GF}{4} \varepsilon \quad (2.20)$$

Así las deformaciones iguales en los brazos opuestos se suman, mientras que las deformaciones iguales en brazos adyacentes se cancelan, el primer efecto se utiliza para aumentar la sensibilidad del medidor y el segundo para compensar efectos indeseados tal como el de temperatura (Figura 2.19).

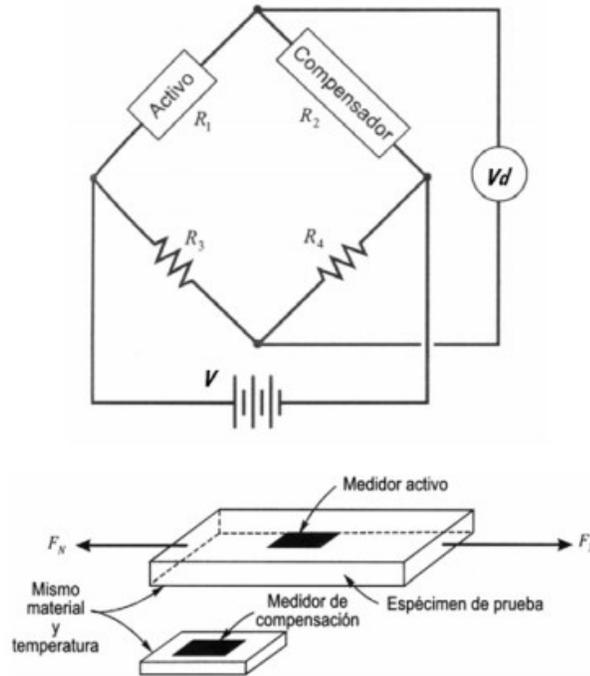


Figura 2.19. Arreglo de puente para compensar temperatura.

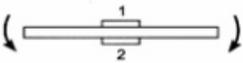
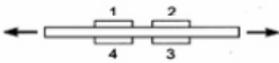
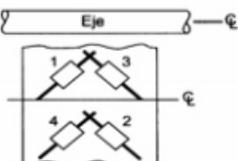
❖ Constante del puente k

Se define como la razón de la salida del puente real a la salida de un solo medidor que detecta la deformación cuando las otras resistencias permanecen fijas, ecuaciones (2.18) y (2.19), para valores de $\delta R / R \ll 1$; la salida del puente para un medidor será (ecuación 2.20):

$$\frac{\delta V_d}{V} = \frac{kGF\varepsilon}{4} \quad (20)$$

La constante del puente depende de la localización de los medidores en el espécimen de prueba y de la posición de la conexión del medidor en el circuito puente, de acuerdo con lo anterior, la sensibilidad del puente se puede asociar con la constante del puente (Tabla 2.14.).

Tabla 2.14. Arreglos de puentes y su compensación.

Arreglos	Compensación proporcionada
 Un solo medidor bajo esfuerzo uniaxial	Ninguna $k=1$
 Dos medidores detectan deformaciones iguales pero opuestas: arreglo típico para flexión	Temperatura $k=2$
 Dos medidores bajo esfuerzo uniaxial	Sólo flexión $k=2$
 Cuatro medidores con pares que detectan deformaciones iguales pero opuestas	Temperatura y flexión $k=4$
 Un medidor axial y uno de Poisson	$k=1+\mu$
 Cuatro medidores con pares que detectan deformaciones iguales pero opuestas: sensible sólo a la torsión. Arreglo típico de eje.	Temperatura y axial $k=4$

❖ Características de desempeño

El funcionamiento de la galga extensométrica depende de los parámetros explicado anteriormente. El procedimiento de instalación y pegado depende de la experiencia que tenga el instalador de la galga. En la actualidad, las técnicas de instalación y pegado permiten alcanzar resultados confiables.

- Variación del factor de gala por la temperatura.
- Resistencia y tolerancia
- Efectos de la temperatura en la resistencia
- Capacidad de elongación
- Vida de fatiga
- Rango de temperatura de operación de las galgas

❖ Limitaciones

- El esfuerzo aplicado no debe llevar a la galga fuera del margen elástico
- Se necesita una buena adhesión al objeto, para que la medida de la deformación sea correcta.
- Un incremento en la temperatura tiene como consecuencia una variación de la resistencia aún sin aplicar ningún esfuerzo.
- Coeficiente de dilatación de la galga parecido al del soporte para evitar tensiones mecánicas.
- Auto calentamiento de la galga por la disipación de potencia de alimentación.

❖ Ventajas

- Pequeño tamaño
- Pueden ser alimentadas con corriente continua o corriente alterna
- Tienen una excelente respuesta en frecuencia
- Pueden utilizarse para medidas estáticas y dinámicas
- Compensación de temperatura relativamente fácil No son influidas por los campos magnéticos

2.7.3.6. Técnica de medición del cambio en el espaciamiento entre pares de indentaciones de dureza

El método de medición de esfuerzos residuales superficiales propuesto es utilizado en aleaciones de aluminio durante procesos de maquinado, donde la velocidad de corte tiene un efecto en la vida de fatiga.^[65] Este método está basado en realizar indentaciones de dureza para conocer la magnitud de los esfuerzos residuales, y su signo, ya sea compresión o tensión. En este trabajo de investigación, sus autores fueron atraídos por la simpleza y facilidad de los métodos de indentación^[32]. La huella de dureza es sensible a los esfuerzos residuales presentes en la superficie del material (Figura 2.18.).

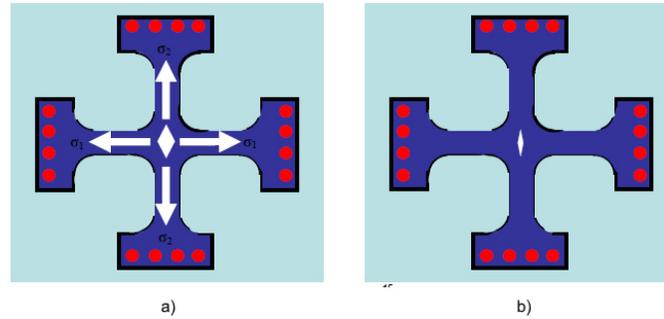


Figura 2.20. Ilustración de como la forma de la huella de microdureza puede cambiar cuando el material tiene un relevado de esfuerzos. (a) La muestra en forma de cruz pre-estresada y la indentación de micro-dureza realizada. (b) La indentación de micro-dureza se deforma una vez que los esfuerzos residuales son liberados ^[66].

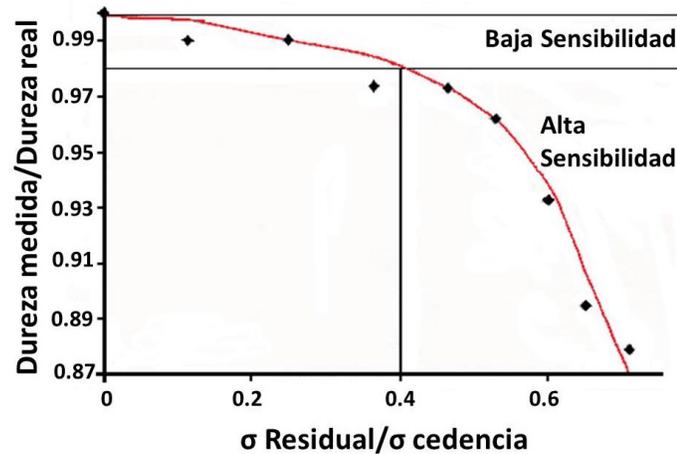


Figura 2.21. Variación de la dureza medida después del relevado de cambio de esfuerzos elásticos con esfuerzo residual normalizado.

En la Figura 2.21., se observa que a determinada cantidad de esfuerzos residuales, existe baja sensibilidad para distinguir el cambio entre la huella medida (indentación afectada por los efectos de los esfuerzos residuales) y la huella de dureza verdadera (indentación original, o sin esfuerzos). Este problema de sensibilidad se resolvió al utilizar dos indentaciones con un espaciamento entre ambas huellas. Este procedimiento es esencialmente similar a monitorear el cambio en la longitud de los extensómetros en la prueba de tensión, excepto que la longitud medida es monitoreada después del relevado de esfuerzos.

❖ Procedimiento del método

El procedimiento de este método consta de los siguientes pasos:

1. Inmediatamente después del proceso de maquinado se preparan pares de indentaciones de micro-dureza espaciadas a una distancia conveniente en la superficie de la huella maquinada.
2. Se miden las distancias entre cada grupo de parejas de indentación. Cada par de indentación debe estar orientado en ángulos rectos y de ser posible a 45° de una dirección dada, por ejemplo, en la dirección de la alimentación, esto para poder documentar las variaciones de los esfuerzos residuales en el plano de la operación de maquinado. La liberación de esfuerzos en la muestra tratada disminuirá si se encontraba bajo tensión, en tanto que se incrementará en el caso de superficies que estuvieran en compresión, (Figura 2.21.).
3. Medir el cambio en el espaciamiento concerniente a cada par de indentaciones.
4. Del conocimiento de parámetros conocidos, en particular el módulo de Young y la razón de Poisson pueden ser estimados los esfuerzos residuales.

Este método provee una forma económica para determinar si la superficie de aleaciones de aluminio ha sido maquinada en forma abusiva. El cambio en la distancia entre indentaciones dependerá de las propiedades del material, así como de los parámetros de maquinado, en particular de la rapidez de corte (Figura 2.22.).

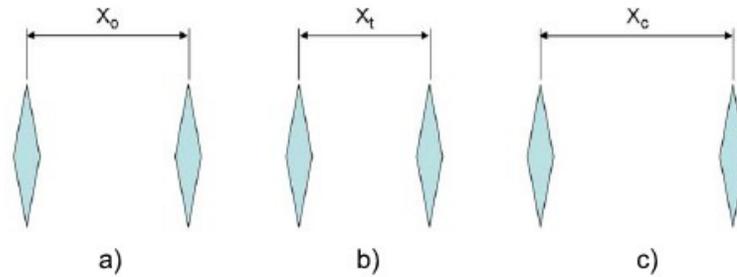


Figura 2.22. Diagrama donde se muestra el comportamiento de las indentaciones de dureza cuando los esfuerzos residuales son relevados. (a) El par de indentaciones original, sin relevado de esfuerzos. (b) El cierre de la distancia entre indentaciones, lo cual indica que la superficie estaba a tensión antes del relevado de esfuerzos. (c) La expansión de la distancia entre indentaciones indica que la superficie estaba a compresión antes del relevado de esfuerzos.

❖ Sensibilidad del método

Este método ha sido utilizado para medir esfuerzos residuales superficiales generados por procesos de maquinado en aleaciones de aluminio. La simpleza, rapidez, economía y confiabilidad de las mediciones lo hacen factible para utilizarse en otros materiales, así como en otros procesos [32]. El módulo de Young de una aleación de fundición de aluminio típica es de aproximadamente 70 GPa (10.000 psi) [67]. Si se supone que la tensión elástica residual en un componente varía entre 10% y 100% del rendimiento estrés una variación muy probable en el caso de una aleación de aluminio fundido, la sensibilidad del método puede ser estimado de la siguiente manera:

Considerando un estado uniaxial de esfuerzos residuales del 10% el esfuerzo de cedencia, $0.1\sigma_y$. Esto podría considerarse como una buena prueba a la sensibilidad del método, al probar un valor pequeño de esfuerzos residuales, utilizando los valores del esfuerzo de cedencia y el módulo de Young de una aleación vaciada de aluminio.

$$\text{Esfuerzo elástico } (\sigma_e) = 0.1\sigma_y = (0.1 * 310 \text{ MPa}) = 31 \text{ MPa} \quad (2.22)$$

$$\text{Deformación elástico } (\varepsilon_e) = \frac{31 \text{ MPa}}{(E)\text{Módulo}} = \left(\frac{31 \text{ MPa}}{70 \times 10^3}\right) = 4.4 \times 10^{-4} \quad (2.23)$$

Suponiendo un espaciamiento de marcas de 50 mm, el desplazamiento estaría dado por: Desplazamiento (D_i) = Distancia entre indentaciones * Deformación elástica (ϵ_e).

$$D_i = (50 * 4.5 \times 10^{-4}) = 0.0225 \text{ mm} = 22.5 \mu\text{m} \quad (2.24)$$

Tal como se observa (ecuación 2.24), en una cantidad mínima de esfuerzos residuales es posible medir esta distancia (D_i) con un microscopio viajero. Debido a que un punto crítico de este método es la distancia necesaria entre las indentaciones, el método no resulta conveniente para situaciones donde existan variaciones excesivas en los valores del esfuerzo residual, entre las huellas indentadas, como por ejemplo en las zonas afectadas por calentamiento en soldaduras, donde no sería posible medir las huellas indentadas si están colocadas de forma perpendicular al cordón de soldadura.

2.7.3.7. Sistema de Replicación Metalográfica (RepliSet)

El sistema para la replicación metalográfica RepliSet es un método de evaluación no destructivo, está diseñado para transferir la estructura de una superficie sólida a una réplica flexible y altamente precisa y estable. El resultado es una copia exacta 3D de la superficie, lo que permite el examen microscópico y mediciones precisas. RepliSet es un sistema de replicación aceptado por la norma ASTM E 1351 ^[68], ^[69]. "Práctica estándar para la producción y evaluación de campo metalográficas" especialmente formulado de dos componentes de goma de silicón de curado rápido de 18 minutos de curado a 25 °C (77 ° F) (Figura 2.22.). Los compuestos se suministran en cartuchos y se aplican usando pistolas dispensadoras. Los cartuchos contienen tanto polímero y agente de curado, que se mezclan de forma automática en una boquilla estática de mezcla desechable durante la aplicación a la superficie.

Varias puntas de boquilla reutilizables están disponibles para la difusión del compuesto en una superficie plana o para la realización del compuesto en los agujeros y cavidades. Con la pistola dispensadora de fácil uso, cualquier persona con poca experiencia puede producir réplicas perfectas en la mayoría de los materiales sólidos comunes (metales, cerámicas, plásticos y vidrio).



Figura 2.23. RepliSet F5, a) cartucho de 50 ml, b) boquilla estática de mezcla desechable, c) pistola dispensadora.

Tabla 2.15. Datos técnicos del sistema de replicación metalográfica RepliSet F5. RepliSet F5.

Datos técnicos	RepliSet F5
Viscosidad del compuesto sin curar	Muy baja
Reproducción de detalles	0.1 μm
Contracción	Despreciable
Resistencia al desgarre	15-20 kN/m^2
Dureza (Shore A)	30
Rango de temperatura de la superficie a ser examinada	-10°C a +180°C (14°F a +356°F)
Vida útil de la réplica acabada	Prácticamente indefinida

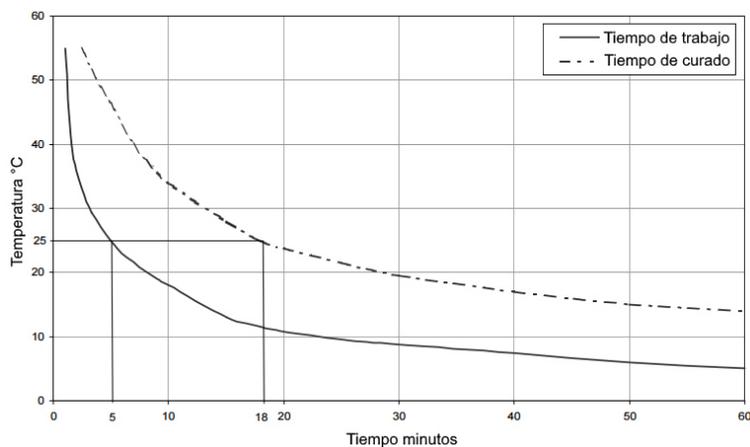


Figura 2.24. Especificaciones de tiempo de curado de RepliSet F5.

En general, el clima no representa ningún problema. Al ser repelente al agua, puede proporcionar réplicas en condiciones húmedas. Se curará en superficies en un rango de temperatura de -10°C a $+180^{\circ}\text{C}$ permite la inspección rápida y reducir al mínimo posible el tiempo de inactividad de maquinaria. Además, ofrece una muy alta resolución de hasta $0.1\ \mu\text{m}$ sin presentar ninguna contracción, y por lo tanto es adecuado para mediciones de metrología de alta precisión. Las réplicas se pueden transportar sin ningún problema y se pueden almacenar de forma indefinida para futuras consultas (Figura 2.25.).

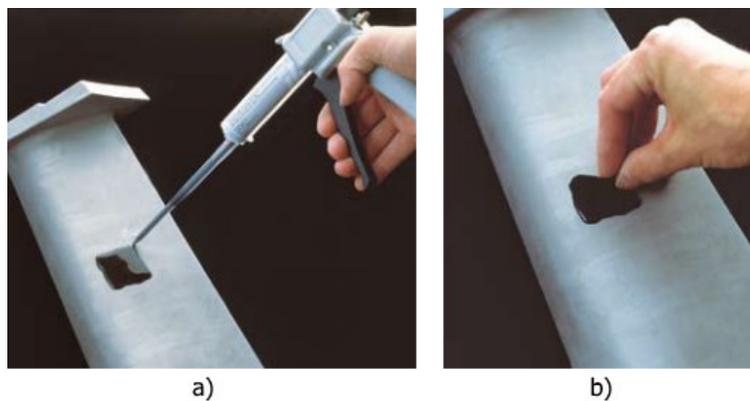


Figura 2.25. a) Un operador distribuye RepliSet en una superficie, b) Un operador retira la réplica curada.

El sistema de replicación está optimizado para el uso de microscopía óptica de luz reflejada. Las réplicas reflejará la luz como un metal. Esto los hace muy bien adaptados para su análisis microestructural con aumentos de hasta 500X utilizando campo Claro, campo oscuro. La interferometría de luz blanca se puede utilizar para mediciones precisas de la superficie incluida la determinación de acabado superficial. Las réplicas a menudo pueden dar mejores resultados que la superficie original, debido a la uniformidad de su reflexión.

❖ **Almacenamiento y transporte**

- Doblar papel de soporte para proteger la réplica.
- Mantener la réplica en una bolsa de plástico.
- Limpiar la réplica con cinta o alcohol, si es necesario.
- Vida útil de réplica de acabado de al menos 2 años.

❖ **Funciones típicas son:**

- Detección y seguimiento de las picaduras, corrosión, grietas, fluencia, deformación y desgaste.
- Evaluación de los cambios en la microestructura.
- La inspección de las superficies internas tales como roscas del agujero de perno y soldaduras de raíz en tubos de pequeño diámetro.
- Control de calidad de los bordes, alturas, ángulos, acabado superficial, hilo pro archivos y otras dimensiones.

CAPÍTULO III

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.1. Introducción

Para llevar a cabo los objetivos planteados en el presente estudio, se describe por medio un diagrama de bloques en la Figura 3.1, desde su manufactura hasta, la medición de los esfuerzos residuales en 42 puentes entre cilindros correspondientes a 7 monobloques V8 de aluminio.



Figura 3.1. Diagrama de bloques del procedimiento experimental.

3.2. Características del producto automotriz

El monobloque V8 de aluminio (Figura 3.2. b) tiene dos bancos de cuatro cilindros con camisas de hierro gris (Figura 3.2. a), que comparten cigüeñal formando una "V", siendo una configuración muy común en vehículos de gran tamaño. Los seis puentes entre cilindros (Figura 3.2. c) son las regiones de interés para el estudio, la selección de estas zonas está motivada por la vasta base de datos existente de mediciones de esfuerzos residuales en la industria automotriz, facilitando la predicción, estimación y entendimiento del comportamiento de los esfuerzos. Como ya se ha mencionado, la estimación de coeficientes de seguridad de los de esfuerzos residuales originados alrededor de las camisas de cilindros durante el enfriamiento nos permite evitar distorsiones y/o fallas prematuras del material.

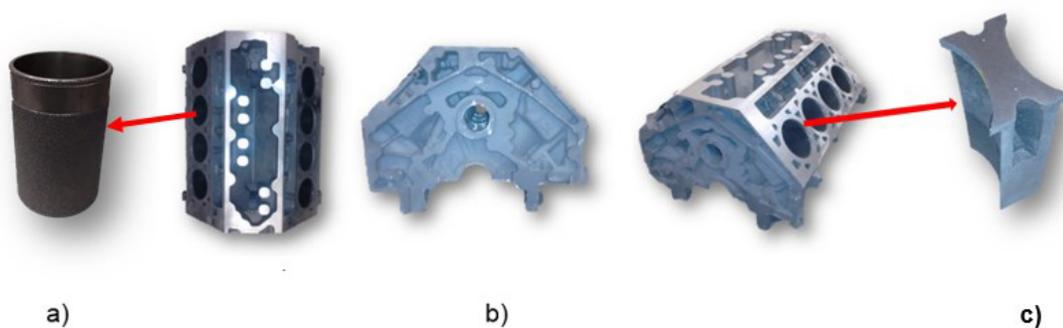


Figura 3.2. a) Camisas de hierro gris, b) Monobloque V8 de aluminio, c) Puente entre cilindros.

3.2.1. Composición química

El análisis químico del monobloque V8 de aluminio estudiado corresponde a una aleación tipo A319, este fue realizado en un espectrómetro de chispa (Spectrolab tipo LAVMB05B).

3.2.2. Microestructura

La microestructura del monobloque corresponde a una aleación de aluminio-silicio para fundición, la preferencia del uso de estas aleaciones es por la buena fluidez, atribuible a la relativa alta concentración de silicio, la superior relación resistencia/peso en comparación al acero y la alta conductividad térmica. A continuación, se describe el procedimiento para la preparación metalográfica de los puentes entre cilindros:

❖ Selección del lugar y extracción de la muestra

Se seleccionó la superficie del puente entre cilindros donde fue adherida la galga extensométrica, así como donde se realizaron el par de indentaciones para el estudio de caracterización microestructural (Figura 3.3).

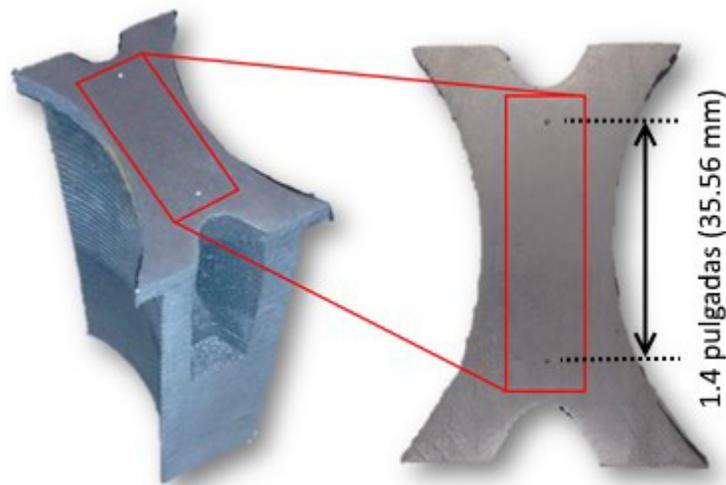


Figura 3.3. Zona seleccionada del puente entre cilindros para el estudio de caracterización microestructural.

❖ Desbaste

Se sometió a las muestras a un desbaste fino mediante el empleo de papel de lija (Struers ® Grit 60,120, 320, 500, 800, 1200, 2400 de carburo de silicio). El desbaste se hizo a mano, pasando la muestra sobre la lija colocada sobre el disco de la pulidora (Allied ® TwinPrep 3) a 400 r.p.m. y vertiendo un chorro de agua que lavó continuamente el papel durante toda la operación. Terminando el desbaste fino, se procedió a un prolijio lavado de cada muestra y de las manos, para evitar contaminar el paño durante la operación del pulido.

❖ Pulido

Se hizo con el objetivo de eliminar todas las rayas finas producidas durante el desbaste, tendiendo a obtener una superficie especular. El pulido se efectuó sobre un paño de billar (Lapmaster ® 10" Billiard PSA Backed Polishing Cloths) bien estirado y sujeto sobre el disco de la pulidora a 400 r.p.m., se vertió por goteo sobre el paño alúmina (Struers ® AP-D Powder, 1 μm , óxido de aluminio) como abrasivo suspendido en agua destilada. Cada muestra pulida se manejó con precaución, evitando tocar su superficie con los dedos u otro objeto evitando mancharla o rayarla.



Figura 3.4. Máquina lijadora-pulidora para preparación de muestras.

▪ Observación microscópica

Terminado el pulido de las muestras, se observaron mediante un analizador de imagen (Clemex Vision ®), un microscopio óptico (Olympus ® PM63) y un estereoscópico (Olympus ® SZH10) evaluando (Figura 3.5):



Figura 3.5. a) Microscopio óptico, b) Estereoscopio.

▪ Espaciamiento dendrítico secundario (EDS)

Se evaluó el EDS midiendo la longitud total de una serie de al menos 4 brazos y dividiéndola entre el número de éstos. Se realizaron 5 mediciones a 50X obteniéndose las desviaciones estándar del análisis.

▪ Porcentaje de porosidad y tamaño de poro máximo

Se evaluó por medio analizador de imagen para medir la fracción de área que ocuparon los poros en 10 campos por cada muestra a 50X, determinando el tamaño de poro máximo, así también se realizó un análisis estadístico, arrojando los resultados con sus respectivas desviaciones estándar.

- **Nivel de modificación de la fase eutéctica de silicio**

La modificación de la fase eutéctica de silicio se evaluó a 100x, se hizo comparativo con estándares de la AFS (American Foundrymen's Society), la escala es del 1 al 6, donde el número 1 corresponde a silicio laminar y el número 6 corresponde a silicio sobremodificada.

- **Tamaño de grano**

El tamaño de grano se evaluó mediante un analizador de imagen y un estereoscópico a 100X, después de pulida la muestra se atacó con solución Keller, se utilizó luz polarizada en diferentes ángulos de inclinación para destacar los bordes de grano y se utilizó el método de intercepción lineal de acuerdo con la norma ASTM E112, clasificando del tamaño de grano según la Sociedad Americana de Fundidores.

- **Ataque**

El ataque químico se hizo sumergiendo la muestra con la cara pulida hacia arriba en solución Keller (0.5 partes de ácido fluorhídrico concentrado, 2.5 partes de ácido nítrico concentrado, 1.5 partes de ácido clorhídrico concentrado, 95.5 partes de agua destilada) durante 5 minutos a temperatura ambiente.

3.2.3. Tratamientos térmicos

La temperatura de vaciado de la aleación de aluminio tipo A319 es a 720 °C, antes del vaciado, los cilindros de hierro gris fueron precalentados a 400 °C. Después del vaciado, los monobloques V8 de aluminio fueron sometidos a un tratamiento térmico de recuperación de arena, enfriamiento con aire forzado (3 minutos de duración) y a un tratamiento térmico T7 que consiste de un tratamiento de solución a una temperatura de

490°C (4 a 6 horas), después pasan por un túnel de enfriamiento donde se hace un temple con aire (4 a 5 minutos), y por último un tratamiento de envejecido a una temperatura por encima de los 200°C por un periodo similar al tratamiento de solución, esto con la finalidad de homogenizar, mejorar la estabilidad dimensional, la maquinabilidad y optimizar resistencia mecánica, ductilidad y dureza requeridos. Cabe señalar que el envejecimiento ayuda a relajar esfuerzos residuales formados durante la solidificación y enfriamientos desde temperaturas de solución, vaciado y temple.

3.3. Técnica de galgas extensométricas

Esta técnica hace uso de galgas extensométricas uniaxiales que varían su resistencia eléctrica en función de la deformación que sufre la superficie de los puentes entre cilindros sobre la cual son adheridas después de un relevado de esfuerzos, relacionado esta deformación mediante la ley de Hooke con los esfuerzos residuales.

3.3.1. Preparación de los puentes entre cilindros

El proceso de preparación de la superficie es tan importante como el proceso de instalación de la galga extensométrica para obtener una medición precisa. La superficie de los puentes entre cilindros previamente mecanizados a las especificaciones del cliente, no deben presentar ningún agente extraño entre la galga y la superficie. A continuación se describe el procedimiento a seguir:

1. Aseo de las manos y de la superficie de trabajo, se utilizó guantes y pinzas para realizar estas tareas, para evitar contaminar la superficie.
2. Se lijó la superficie del puente entre cilindros donde se instaló la galga extensométrica (Micro Measurements ® CEA-13-125UN-350) para remover cualquier agente extraño o residuo adherido de óxido, pintura, aceite, grasas, contaminantes orgánicos, posibles residuos químicos, etc., y lograr una superficie tersa o de textura fina. Al ser la

superficie muy rugosa, se desbastó con ayuda de una turbina neumática y una lija (Struers ® ANSI grano 60, 120 de carburo de silicio) y para un mejor acabado, se utilizó papel de lija (Struers ® ANSI grano 320, 500 de carburo de silicio). El papel de lija se humedeció con solución acida acondicionadora (Micro Measurements ® M-Prep Conditioner, ácido fosfórico 5.0 a 6.0%, agua destilada 93.5 a 94.9%) y se aplicó frotando en un solo sentido y luego de esto se asearon con cuidado de no contaminar nuevamente (Figura 3.6.).

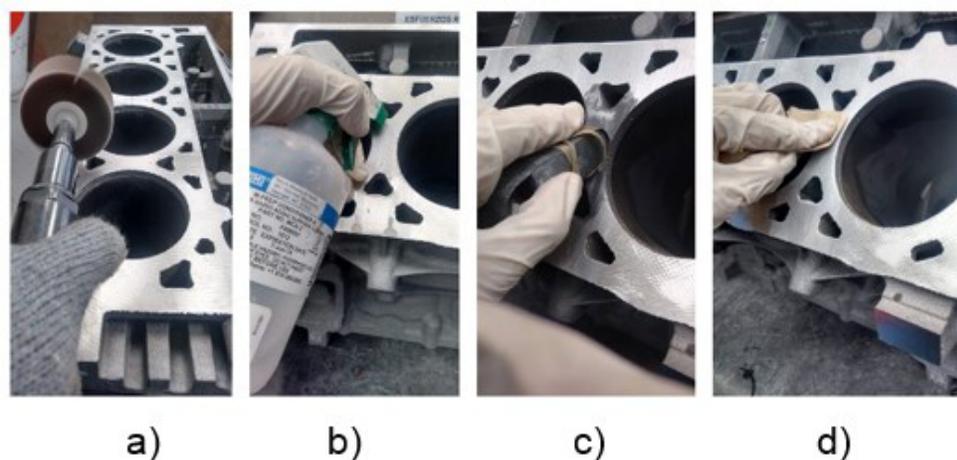


Figura 3.6. a) Desbaste con turbina neumática y lija, b) Aplicación de solución acida acondicionadora, c) Acabado fino con papel de lija, d) Aseo de los puentes entre cilindros.

3. Se utilizó una solución acida acondicionadora y cotonetes para asear la superficie desplazando el cotonete en un sólo sentido hasta que la fibra del cotonete no muestre residuos. Se realizó la misma acción, con solución neutralizadora (Micro Measurements ® M-Prep Neutralizer 5A, hidróxido de amonio 0.02%, tetraborato de sodio pentahidratado 0.01% en peso). Se localizó y orientó el centro del puente entre cilindros marcando la superficie con un lápiz, mismo que será tomado para el sistema de replicación de indentaciones (Figura 3.7.).

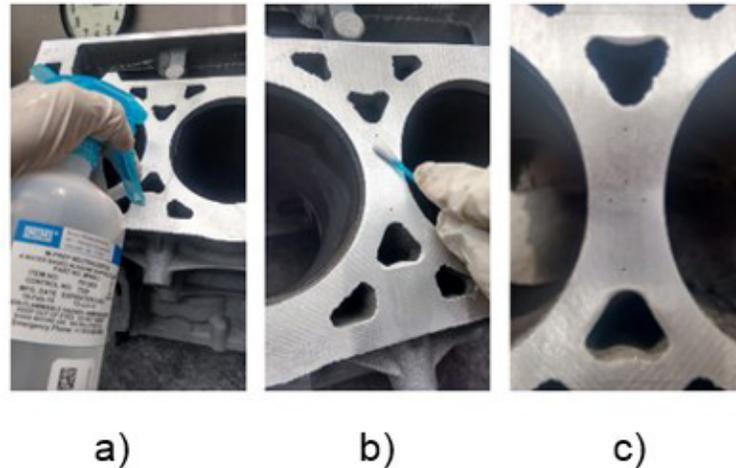


Figura 3.7. a) Aplicación de solución neutralizadora, b) Aseo con cotonetes, c) Marcaje con lápiz del centro del puente entre cilindros.

4. Se removió la galga extensométrica de su envoltura de acetato, tomándola por una esquina y luego se colocó en una superficie previamente limpia y neutralizada, con el lado opaco (reverso) hacia abajo con ayuda de unas pinzas. Se cortó un pedazo de cinta adhesiva especial para galga (Micro Measurements® PCT-2M Gage Installation Tape), colocándola sobre la galga para que se adhiriera y poder transportarla hacia el monobloque. Se retiró la cinta con la galga adherida de la superficie a un ángulo máximo de 35°-40° de inclinación para no precargarla o deformarla (Figura 3.8.).

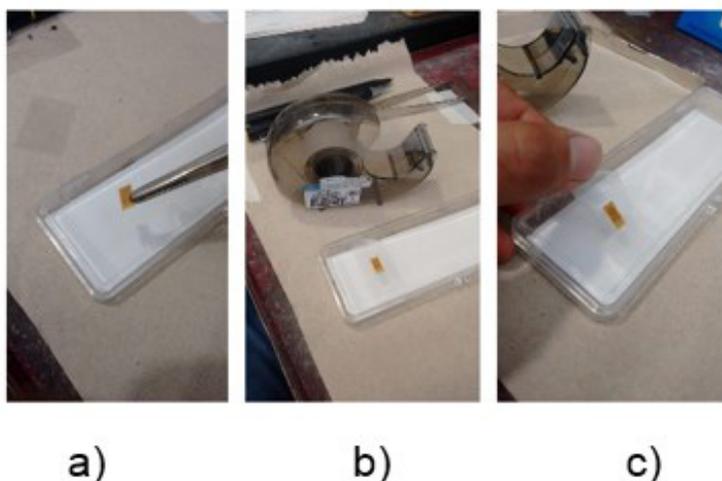


Figura 3.8. a) Manejo de la galga extensométrica con pinzas, b) Uso de la cinta adhesiva especial, c) Transportación de la galga extensométrica con ayuda de la cinta adhesiva.

Se ubicó y colocó la cinta con la galga extensométrica adherida a ella, apoyado con las referencias hechas a lápiz en el centro del puente entre cilindros levantando la cinta adhesiva hasta que la parte opaca de la galga quedó expuesta. En ese momento, se aplicó catalizador (Micro Measurements ® M-Bond 200 Catalyst C) en la superficie opaca expuesta de la galga, esperando unos segundos a que seque. En seguida se aplicó una o dos gotas de adhesivo (Micro Measurements ® M-Bond 200 Adhesive) en la unión de la cinta adhesiva y el puente entre cilindros. Inmediatamente se corrió la cinta con la galga extensométrica. Se hizo esto a una inclinación de 30° corriendo el adhesivo, sujetándola firmemente, manteniendo presionado la cinta adhesiva principalmente en el área de la galga extensométrica por espacio de 2 minutos (Figura 3.9.).

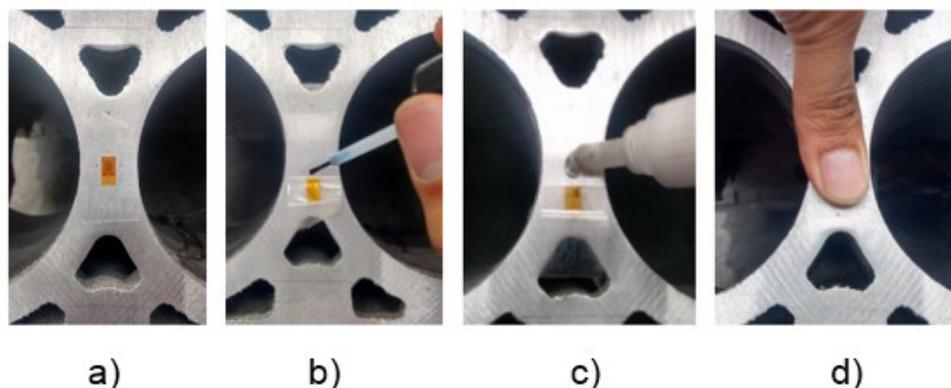


Figura 3.9. Colocación de la cinta con la galga apoyado con las referencias en el centro del puente entre cilindros, b) Aplicación de catalizador en la superficie opaca expuesta de la galga, c) Aplicación de una o dos gotas de adhesivo en la unión de la cinta adhesiva y el puente entre cilindros, d) Presionar la cinta adhesiva.

Dejando pasar 10 minutos, se retiró la cinta adhesiva a 180° deslizándola paralelamente hacia el otro extremo de la cinta con movimiento suave. Con pinza pela cables se preparó las puntas del cable (Micro Measurements $\text{\textcircled{R}}$ 326-DFV 6503 3 Conductor cable 1000ft. /300m), por un extremo pelando a 1 mm, separando la punta roja de la punta negra y blanca (estas últimas dejarlas unidas), por el otro extremo del cable, separando las tres puntas, y pelado a 5 mm. Aplicando fundente a los dos puntos de conexión de la galga extensométrica y presentando el extremo en el que no se separó las puntas blanca y negra sobre estos, con la punta roja al lado izquierdo. Se aplicó soldadura de plata suficiente sobre las puntas de los cables uniéndolos a los dos puntos de conexión de la galga extensométrica. En seguida aplicando recubrimiento protector (Micro Measurements $\text{\textcircled{R}}$ M Coat A Polyurethane coating) sobre las terminales soldadas y también sobre el área de la galga extensométrica (Figura 3.10.).

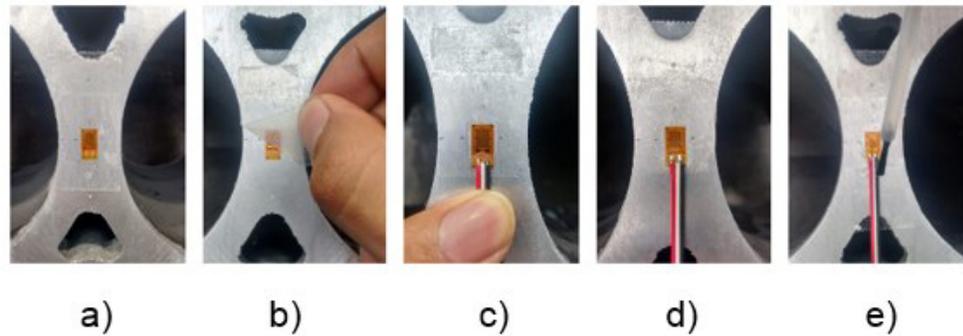


Figura 3.10. a) Galga perfectamente adherida al puente entre cilindros, b) Retiro de la cinta adhesiva, c) Presentación del extremo en el que no se separó las puntas blanca y negra sobre estos, con la punta roja al lado izquierdo en los dos puntos de conexión de la galga extensométrica, d) Aplicación de soldadura en plata suficiente sobre las puntas de los cables uniéndolos a los dos puntos de conexión de la galga, e) Aplicación de recubrimiento protector sobre las terminales soldadas y también sobre el área de la galga.

3.3.2. Medición de esfuerzos residuales

La medición inicial (ϵ_0) y final (ϵ_1) de deformación, se realizó a temperatura ambiente (24°C) con ayuda de una computadora (Windows[®] XP) con un programa (National Instruments[®] LabVIEW 7 Express) que a través de una interfase que contiene un puente Wheatstone presenta directamente la medición de microdeformación ($\times 10^{-6}$). En el programa se especificaron parámetros de entrada como utilizar un circuito de cuarto de puente con un voltaje de excitación de 5V, un coeficiente de Poisson de 0.3 (para tomar en cuenta la deformación del aluminio perpendicular a la medición) y un factor de sensibilidad S de 2.125 que es el especificado por el fabricante de la galga extensométrica uniaxial (Figura 3.11.).

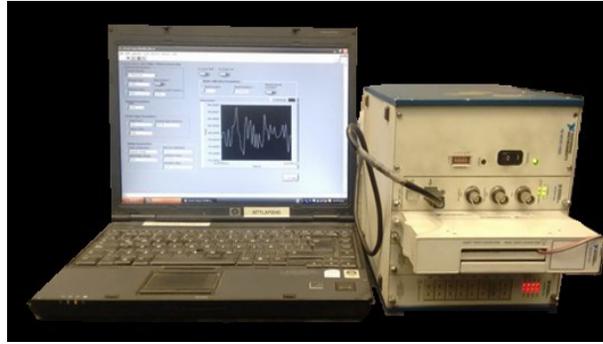


Figura 3.11. Equipo de Computo e interfase para la medición de microdeformación.

1. La medición de microdeformación inicial (Figura 3.12.) obtenidas son debido a la deformación provocada durante el proceso de instalación de la galga en los puentes entre cilindros, ésta representa la deformación inicial (ϵ_0).



Figura 3.12. Medición de las señales de voltaje mediante un puente Wheatstone para la medición de microdeformación antes del relevado de esfuerzos (ϵ_0).

Se protegió las galgas extensométricas (Figura 3.13.) y con ayuda de una sierra de cinta se cortaron los puentes entre cilindros del resto del monobloque, buscando la separación de las camisas de hierro gris (Figura 3.14.).



Figura 3.13. Protección de las galgas extensométricas previo al corte de la sierra cinta.

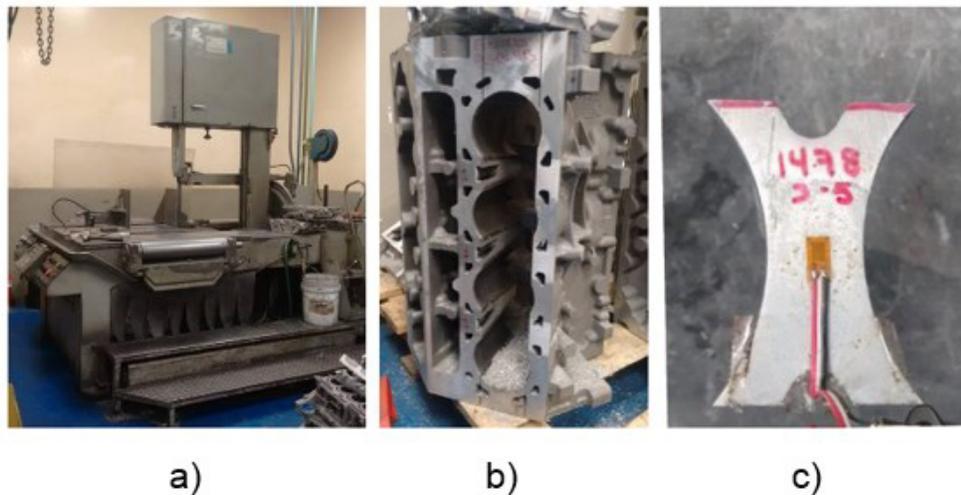


Figura 3.14. a) Sierra cinta de corte, b) Corte de los puentes entre cilindros del monobloque V8 de aluminio, c) Puente entre cilindros cortado.

2. La medición de microdeformación final (Figura 3.15.) obtenidas son debido a la deformación provocada después del relevado de esfuerzos debido al corte de los puentes entre cilindros del monobloque V8 de aluminio. Representado la deformación final (ϵ_1).



Figura 3.15. Medición de las señales de voltaje que mediante un puente Wheatstone para la medición de microdeformación después del relevado de esfuerzos (ε_1).

- Mediante la ley de Hooke (ecuación 3.1), se relacionó la deformación uniaxial con el esfuerzo, y este representó el esfuerzo residual relevado en los puentes entre cilindros. Las propiedades de la aleación de aluminio tipo A319 usadas para el cálculo son un módulo de Young (E) de 70,000 MPa y un coeficiente de Poisson (ν) de 0.3 ^[67]. El signo positivo en los esfuerzos evaluados indicó que los puentes entre cilindros se encontraban sometidos a esfuerzos en tensión.

$$\sigma = E(\varepsilon_0 - \varepsilon_1) \quad (3.1)$$

3.4. Técnica de replicación de indentaciones

Esta técnica hace uso del sistema de replicación de indentaciones midiendo el cambio en el espaciamiento entre pares de huellas en la superficie en los puentes entre cilindros antes y después de un relevado de esfuerzos, relacionado esta deformación mediante la ley de Hooke con los esfuerzos residuales.

3.4.1. Preparación de los puentes entre cilindros

La superficie de los puentes entre cilindros previamente mecanizados a las especificaciones del cliente, no debe presentar ningún agente extraño antes usar la técnica de replicación de indentaciones. A continuación se describe el procedimiento a seguir:

1. Aseo de las manos y de la superficie de trabajo (utiliza guantes y pinzas para realizar estas tareas, eso evitará contaminar la superficie).
2. Se lijó la superficie del puente entre cilindros para remover cualquier agente extraño o residuo adherido de óxido, pintura, aceite, grasas, contaminantes orgánicos, posibles residuos químicos, etc., y lograr una superficie tersa o de textura fina. Al ser la superficie muy rugosa, se desbastaron con ayuda de una turbina neumática y una lija (Struers ® ANSI grano 60, 120 de carburo de silicio) y para un mejor acabado, se utilizó papel de lija (Struers ® ANSI grano 320, 500 de carburo de silicio). El papel de lija se humedeció con solución ácida acondicionadora (Micro Measurements ® M-Prep Conditioner, ácido fosfórico 5.0 a 6.0%, agua destilada 93.5 a 94.9%) y se aplicó frotando en un solo sentido y luego de esto se asearon con cuidado de no contaminar nuevamente (Figura 3.6.). Se realizó la misma acción, con solución neutralizadora (Micro Measurements ® M-Prep Neutralizer 5A, hidróxido de amonio 0.02%, tetraborato de sodio pentahidratado 0.01% en peso) y cotonetes para neutralizar la superficie desplazando el cotonete en un solo sentido (Figura 3.7. a, b).
3. Se localizó y orientó el punzón de centros (Tinius Olsen ®) calibrado a 1.4 pulgadas (35.56 mm), tomando como referencia las marcas hechas a lápiz del centro del puente entre cilindros, mismo que fue tomado para la galga extensométrica. generando el par de indentaciones golpeando firmemente al punzón de centros sobre las referencias previamente marcadas (Figura 3.16.).

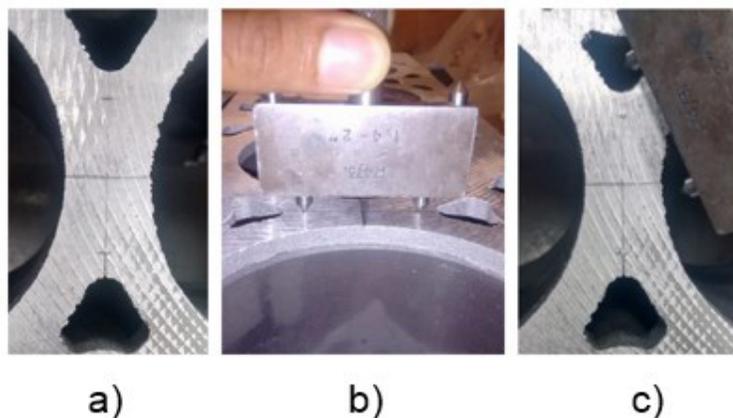


Figura 3.16. a) Marcaje con lápiz del centro del puente entre cilindros, b) Colocación y orientación del punzón de dureza de 1.4 pulgadas (35.56 mm), c) Indentaciones en los puentes entre cilindro.

4. Antes de la aplicación del sistema de replicación (Struers ® RepliSet-F5), apoyado con un nivel de gota, se orientó el monobloque V8 de aluminio de tal forma que el banco de los puentes entre cilindros estén completamente horizontales, esto facilitó su aplicación y previno el escurrimiento de la resina. Con ayuda de la pistola dispensadora (Struers ® RepliSet-F5, Dispensing Gun for 50 ml cartridges), un cartucho de resina (Struers ® RepliSet-F5, Cartridge of 50 ml), y una boquilla de mezcla estática de resina (Struers ® RepliSet-F5, Static-mixing Nozzles), se cubrió el área circundante a las indentaciones hechas con el punzón de centros a 1.4 pulgadas (35.56 mm), generando réplicas positivas, estables y altamente precisas de la superficie de los puentes entre cilindros en 3D (Figura 3.17.).

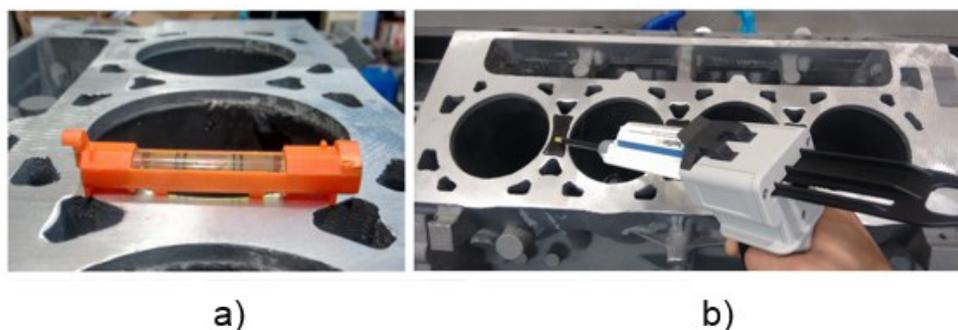


Figura 3.17. a) Orientación horizontal del monobloque V8 de aluminio, b) Aplicación del sistema de replicación cubriendo el área circundante a las indentaciones hechas por el punzón de centros.

Se dejó pasar el tiempo de curado (18 minutos a 24°C) para facilitar la remoción de las réplicas de resina de los seis puentes entre cilindros, sin daño o distorsión (Figura 3.18.). Estos conjuntos de réplicas corresponden al estado antes del relevado de esfuerzos (ϵ_0), las réplicas se transportaron sin ningún problema, pudiendo almacenarlas de forma indefinida para futuras consultas.

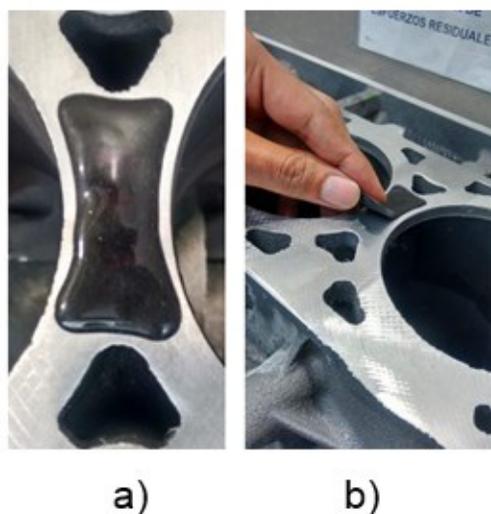


Figura 3.18. a) Tiempo de curado (18 minutos a 25°C), b) Remoción de las réplicas de resina de los puentes entre cilindros.

5. Una vez cortados los puentes entre cilindros del resto del monobloque con ayuda de una sierra de cinta (Figura 3.19.), se aseó la superficie con aplicador de algodón y solución neutralizadora, desplazándolo en un solo sentido hasta que la fibra del cotonete no muestre residuos. Posteriormente se volvió a cubrir el área circundante a las indentaciones hechas con el punzón de centros de 1.4 pulgadas (35.56 mm) con ayuda del sistema de replicación (Figura 3.20.). Estos conjuntos de réplicas corresponden al estado después del relevado de esfuerzos (ϵ_1), las réplicas se transportaron sin ningún problema y se almacenaron de forma indefinida para futuras consultas.

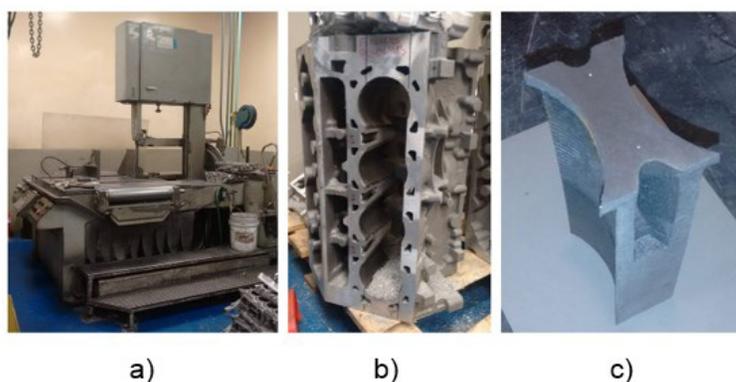


Figura 3.19. a) Cierre cinta de corte, b) monobloque V8 de aluminio sin los puentes entre cilindros del, c) Puente entre cilindros relevado.

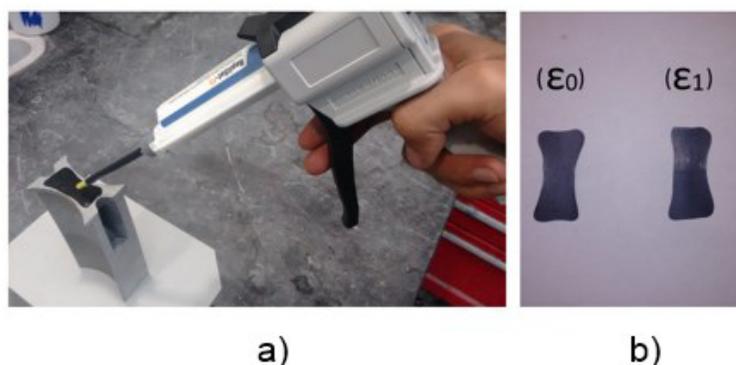


Figura 3.20. a) Aplicación del sistema de replicación de indentaciones en los puentes entre cilindros después del relevado de esfuerzos, b) Réplicas de indentación antes y después del relevado de esfuerzos (ϵ_0 y ϵ_1).

3.4.3 Medición de esfuerzos residuales

El color negro de las réplicas de resina está optimizado para el uso de microscopía óptica, reflejando la luz como un metal (Figura 3.21.). Para este estudio se utilizó un analizador de imagen (Zeiss ® AxioVision) y un microscopio óptico (Zeiss ® Axio Oberver Z1) a 50x (Figura 3.22.) para obtener las mediciones del cambio en el espaciamiento entre pares de indentaciones a temperatura de laboratorio (24°C).



Figura 3.21. Replicación de indentación a 50X.

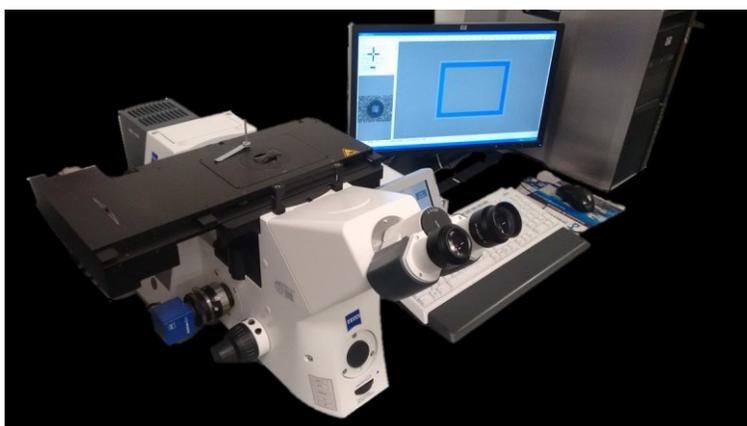


Figura 3.22. Analizador de imagen (Zeiss ® AxioVision) y microscopio óptico (Zeiss ® Axio Oberver Z1).

1. Se midió la distancia entre centros de las indentaciones en las réplicas de los puentes entre cilindros antes del relevado de esfuerzos (Figura 3.23.), esta distancia representó la deformación inicial (ϵ_0).

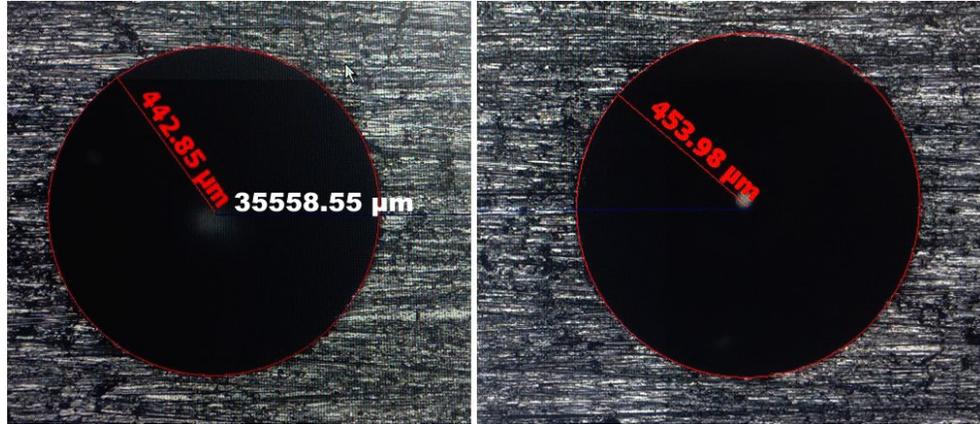


Figura 3.23. Medición inicial entre pares de indentaciones (ϵ_0).

2. Con ayuda de una sierra de cinta, se cortaron los puentes entre cilindros del resto del monobloque, buscando la separación con las camisas de hierro gris (Figura 3.19.).
3. Se midió la distancia entre centros de las indentaciones en las réplicas de los puentes entre cilindros después del relevado de esfuerzos (Figura 3.24.), esta distancia representó la deformación final (ϵ_1).

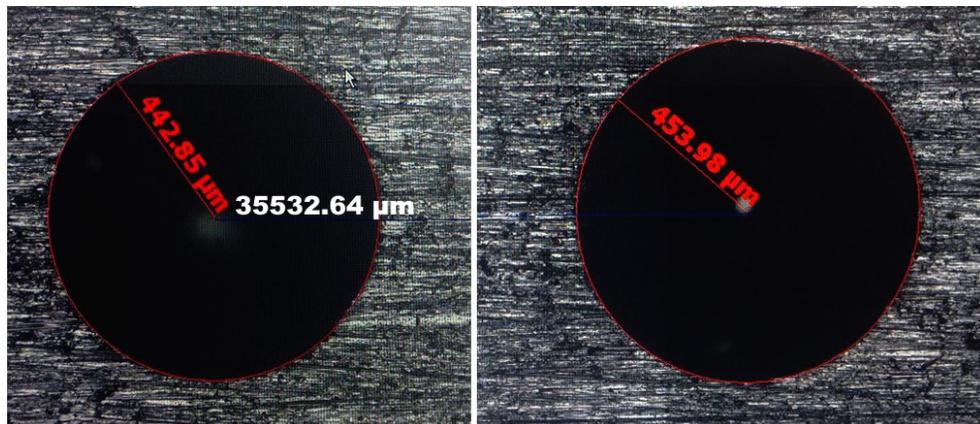


Figura 3.24. Medición final entre pares de indentaciones (ϵ_1).

4. Mediante la ley de Hooke (ecuación 3.1), se relacionó la deformación uniaxial con el esfuerzo, y este representó el esfuerzo residual relevado en el puente entre cilindros. Las propiedades de la aleación de aluminio tipo A319 usada para el cálculo son un módulo de Young (E) de 70,000 MPa ^[67]. El signo positivo en la evaluación de esfuerzos indicó que los puentes entre cilindros se encontraban sometidos a esfuerzos en tensión.

3.5. Validación del sistema de replicación de indentaciones

Las pruebas para la validación del sistema de replicación de indentaciones son el proceso de revisión que verificó y compró que el sistema innovado cumple con las especificaciones y que logra su cometido de generar réplicas positivas, estables y altamente precisas.

Para lograr este objetivo, se realizó un análisis comparativo de la medición del espaciamiento entre pares de indentaciones y mediante el sistema de replicación de indentaciones con la ayuda de un analizador de imagen (Zeiss ® AxioVision) y un microscopio óptico (Zeiss ® Axio Observer Z1) a 50x en los puentes entre cilindros de cinco monobloques V8 de aluminio antes y después de un relevado de esfuerzos en un ambiente controlado (24 °C) (Figura 3.25.).



Figura 3.25. a) Replicación de Indentación en los puentes entre cilindros a 50x, b) Indentación a 50x en los puentes entre cilindros.

3.6. Mapeo de esfuerzos residuales

Se realizó la medición de esfuerzos residuales a lo largo de los puentes entre cilindros mediante la Técnica de Galgas Extensométricas y la Técnica de Replicación de Indentación en dos monobloques V8 de aluminio (Prueba F y G.) y se realizó la preparación de la zona tal como se describió previamente en este capítulo (Apartado 4.3. y 4.4.) con el propósito de mapear los esfuerzos al acercarnos al centro de los puentes entre cilindros y así determinar la distancia de espaciamiento entre indentaciones que sea estadísticamente significativo con la técnica de galgas extensométricas con un nivel de confianza del 95.0% ($\alpha=0.05$) en la medición de esfuerzos residuales.

❖ Prueba F

Tabla 3.1. Configuraciones de indentaciones de la prueba F.

Prueba	Puente entre Cilindros	Configuración
F	1-3	A
	3-5	B
	5-7	A
	2-4	A
	4-6	B
	6-8	A

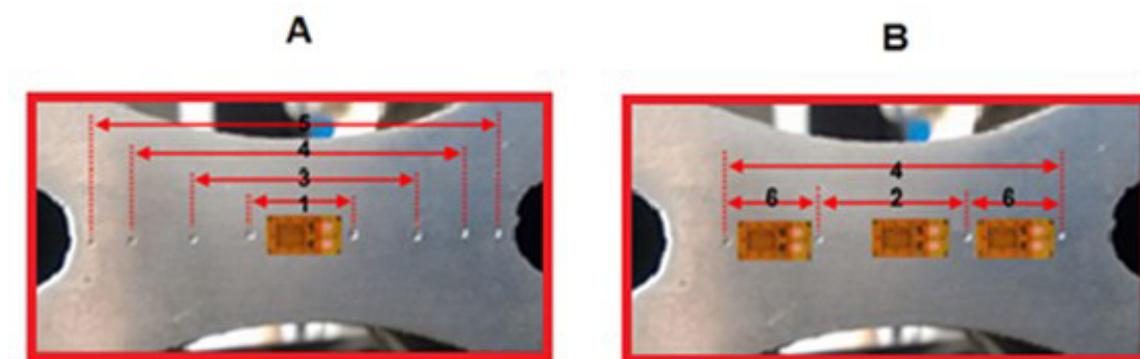


Figura 3.26. Configuraciones A y B de indentaciones de la prueba F.

❖ Prueba G

Tabla 3.2. Configuraciones de indentaciones de la prueba G.

Prueba	Puente entre Cilindros	Configuración
G	1-3	C
	3-5	C
	5-7	C
	2-4	C
	4-6	C
	6-8	C

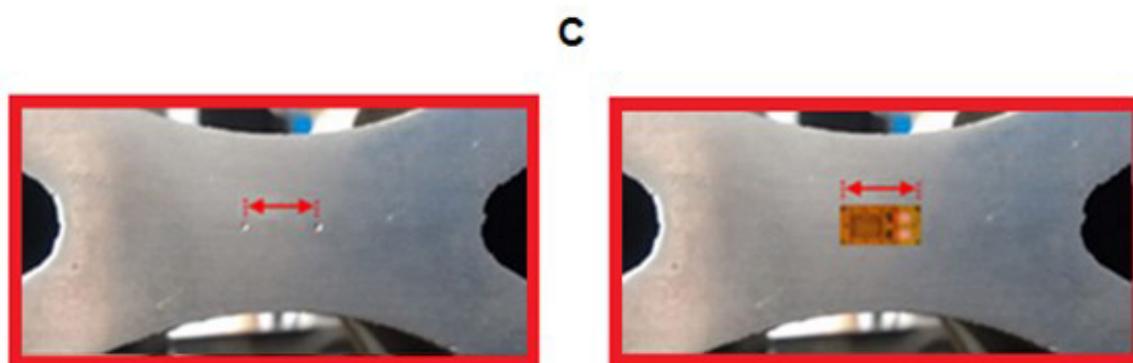


Figura 3.27. Configuraciones C de indentaciones de la prueba G.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Introducción

En este capítulo se presentan los resultados del procedimiento experimental evaluado en 42 puentes entre cilindros correspondiente a siete monobloques V8 de aluminio. El signo positivo en los esfuerzos residuales obtenidos tanto con la Técnica de Galgas Extensométricas (Apéndice A.1.) y como con la Técnica de Replicación de Indentaciones (Apéndice A.3.) indicaron que los puentes entre cilindros se encontraban sometidos a esfuerzos en tensión. Es importante señalar que los datos reportados se obtuvieron al repetir la medición en tres ocasiones y promediarla.

Como ya se ha mencionado en los capítulos anteriores, todos los procesos por los que los monobloques V8 de aluminio fueron sometidos introducen esfuerzos en tensión y/o compresión, desde el vaciado de las piezas, así como el maquinado y los tratamientos térmicos. El propósito de este estudio es el desarrollo y la implementación de la Técnica de Replicación de Indentaciones para la medición de esfuerzos residuales superficiales en los puentes entre cilindros.

4.2. Composición química

El análisis químico de los puentes entre cilindros del monobloque V8 de aluminio de aleación tipo A319 reveló el contenido de los elementos con la siguiente composición química:

Tabla 4.1. Composición química característica del monobloque V8 de aluminio de aleación A319 (%P/P).

Si	Cu	Fe	Mn	Mg	Zn	Ti	Sr (ppm)	Mn/Fe	Al
7.49	2.91	0.611	0.417	0.285	0.364	0.178	161.6	0.682	86.71

4.3. Caracterización microestructural

Una vez realizada la medición de esfuerzos residuales, se evaluó la microestructural de los puentes entre cilindros en la zona donde la galga extensométrica fue adherida, así como donde se realizaron las indentaciones (Figura 4.1.).

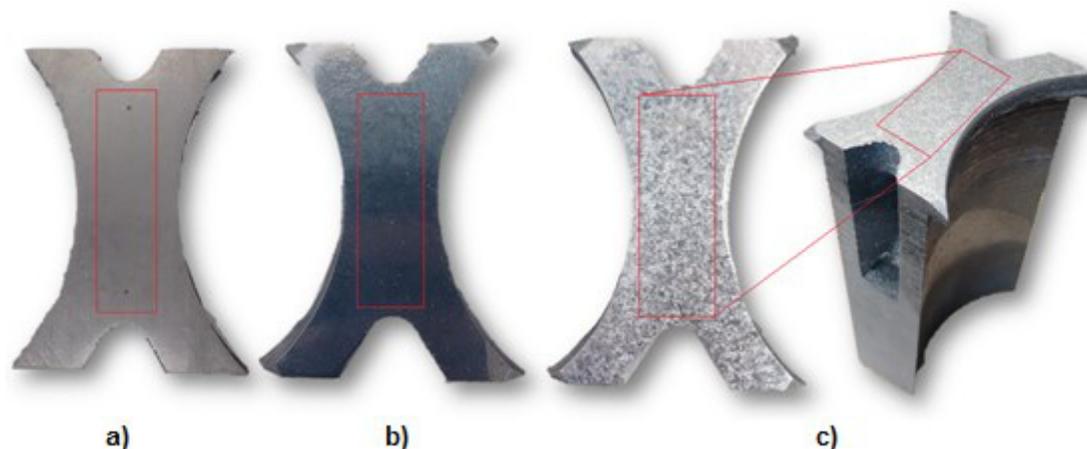


Figura 4.1. a) Zona de análisis en el puente entre cilindros después del relevado de esfuerzo, b) Muestra pulida para la observación microscópica, c) Muestra atacada con composición Keller.

La microestructura caracterizada por una estructura dendrítica de aluminio α , delimitada por el eutéctico Al-Si con un grado de modificación entre 2 y 3 (American Foundrymen's Society) ^[17] en presencia del estroncio. Altos valores de espaciamiento dendrítico secundario (EDS) y de porcentaje de porosidad, corroboran el hecho que la región evaluada es una zona caliente, debido a una velocidad baja de enfriamiento (solidificación) al encontrarse cercano a las entradas de metal y mazarota (Tabla 4.2.).

Tabla 4.2. Evaluación microestructural del monobloque V8 del aluminio.

DAS (μm)	Tiempo de solidificación (s)	Tamaño de grano (μm)	ASTM E9	% de Porosidad	Poros máximo (μm)	Modificación de la fase eutéctica de silicio
84.01	592.89	342.89	Fino	0.731	526.89	Entre 2 y 3

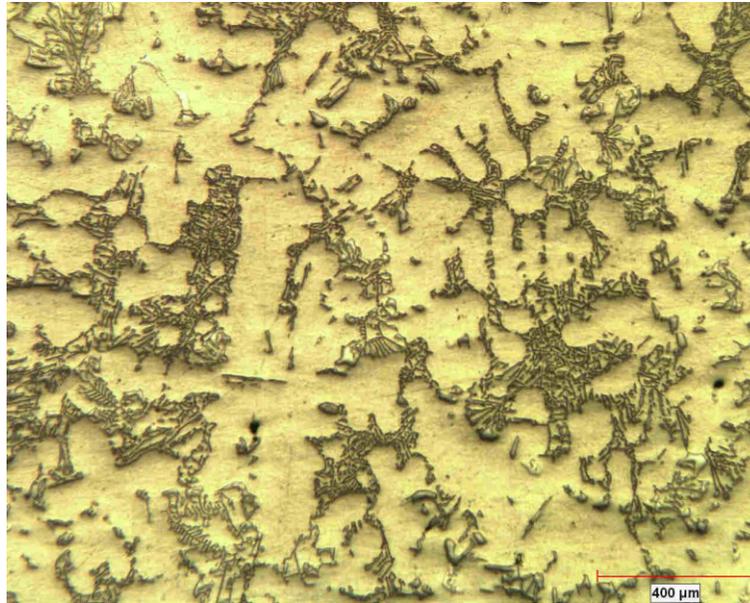


Figura 4.2. Microestructura característica a 50X del puente entre cilindros.

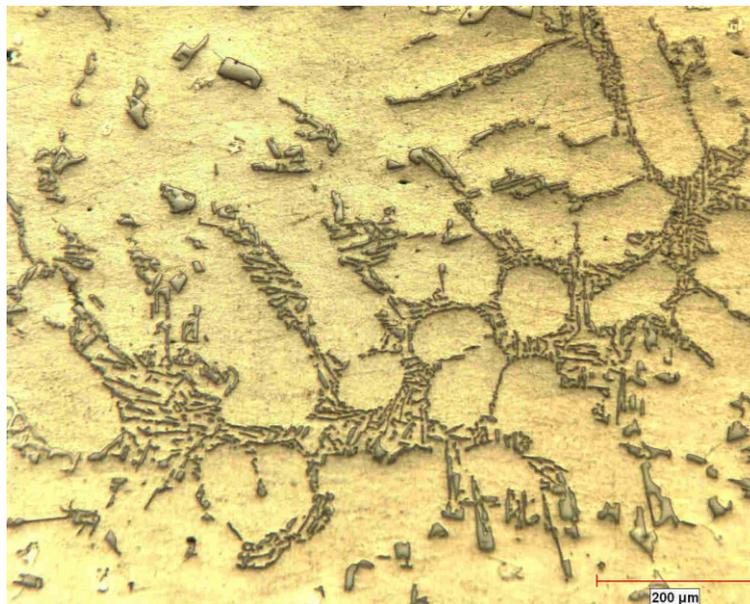


Figura 4.3. Nivel de modificación de la fase eutéctica de silicio entre 2 y 3 (AFS) ^[17] a 100X del puente entre cilindros.

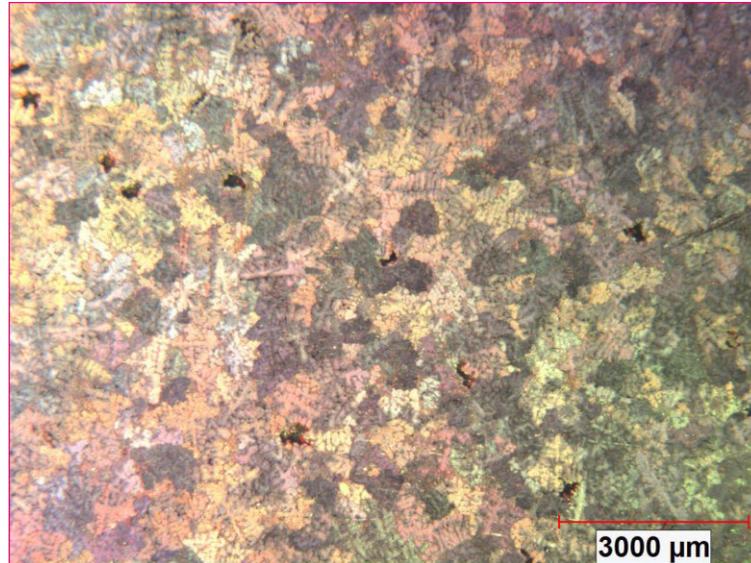


Figura 4.4. Tamaño de grano fino 342.89 μm (AFS) a 100X del puente entre cilindros (ASTM E112).

4.4. Validación del Sistema de Replicación de Indentaciones

Se realizó un análisis estadístico comparativo de la medición del espaciamiento entre pares de indentaciones mediante la Técnica de Replicación de Indentaciones y la Técnica de Indentaciones los cuales pueden verse en el Apéndice A.2, con la ayuda del analizador de imagen y el microscopio óptico en los puentes entre cilindros de cinco monobloques V8 de aluminio antes y después del un relevado de esfuerzos (por medio del corte con la sierra cinta) en un ambiente controlado (24 °C).

La Técnica de Replicación de Indentaciones hace uso del Sistema de Replicación de Indentaciones para transferir la superficie en aleaciones de aluminio a una réplica positiva, precisa y estable. La réplica, se comportó como una superficie metálica al ser examinada con un microscopio óptico a 50x, ofreciendo resultados precisos y rápidos; siendo versátil, fácil de almacenar y transportar. Si bien es cierto que en la actualidad es una metodología destructiva.

La Figura 4.5 nos muestra los valores individuales de la medición del espaciamiento entre pares de indentaciones después del relevado de esfuerzos de cinco pruebas realizadas mediante ambas técnicas con un nivel de confianza del 95.0%. La media del cambio en el espaciamiento entre pares de indentaciones utilizando un punzón de centros calibrado a 1.4 plg (35.56 mm) después del relevado de esfuerzo fue de 24.36 μm .

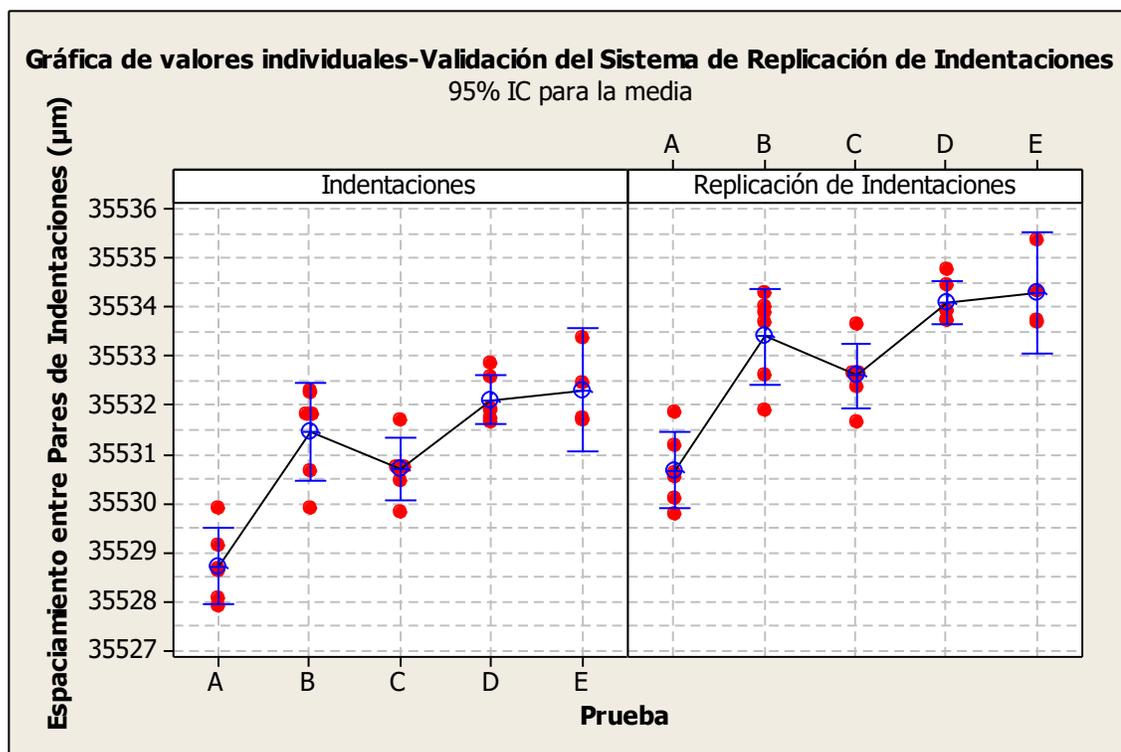


Figura 4.5. Gráfica de valores individuales para la Validación del Sistema de Replicación de Indentaciones después del relevado de esfuerzos.

❖ Distribución de probabilidad para la Validación del Sistema de Replicación de Indentaciones

Tabla 4.3. Valores de la distribución de probabilidad para la Validación del Sistema de Replicación de Indentaciones

Técnica	Media (μ m)	Prueba	Desviación Estándar	Anderson Darling	Valor- p
Indentaciones	35,529	A	0.7401	0.229	0.671
	35,531	B	0.959	0.480	0.139
	35,531	C	0.5961	0.450	0.172
	35,532	D	0.4906	0.453	0.168
	35,533	E	2.155	0.275	0.520
Replicación de Indentaciones	35,531	A	0.7451	0.189	0.822
	35,533	B	0.9375	0.427	0.200
	35,533	C	0.6350	0.454	0.167
	35,534	D	0.4236	0.481	0.139
	35,534	E	0.7817	0.267	0.540

Las gráficas de probabilidad nos permitieron evaluar el ajuste de distribución de las mediciones, así como comparar las diferentes distribuciones de las muestras después del relevado de esfuerzos. Los puntos de datos aproximadamente siguen una línea recta, el valor p está por encima de 0.05 y el estadístico de Anderson-Darling es bajo. Por lo tanto, la distribución normal parece ajustarse bastante bien a los datos de la muestra e cada prueba (Tabla 4.3).

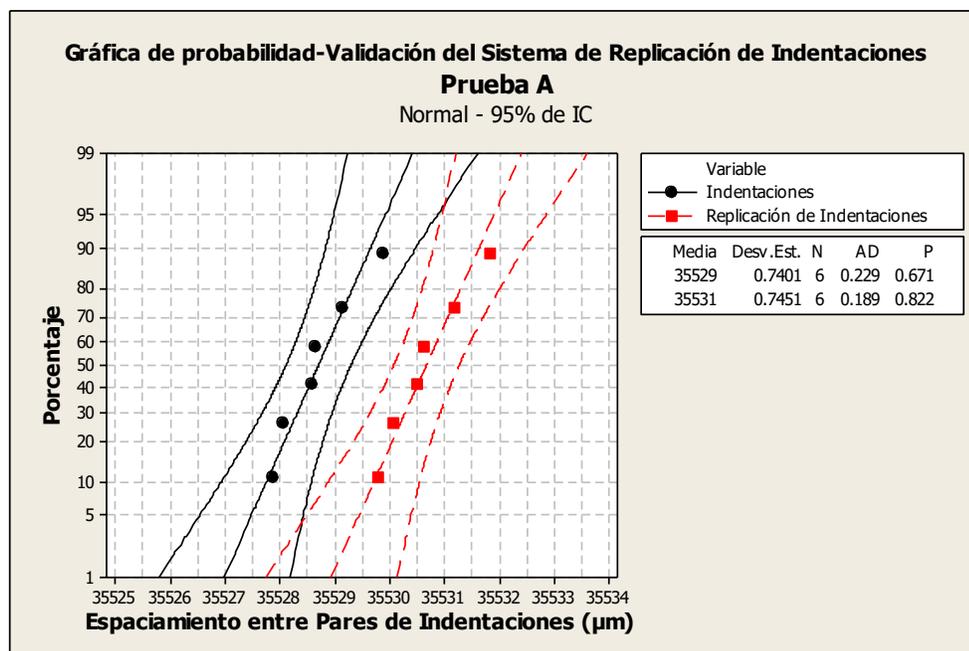


Figura 4.6. Gráfica de Probabilidad para la Validación del Sistema de Replicación de Indentaciones después del relevado de esfuerzos de la Prueba A.

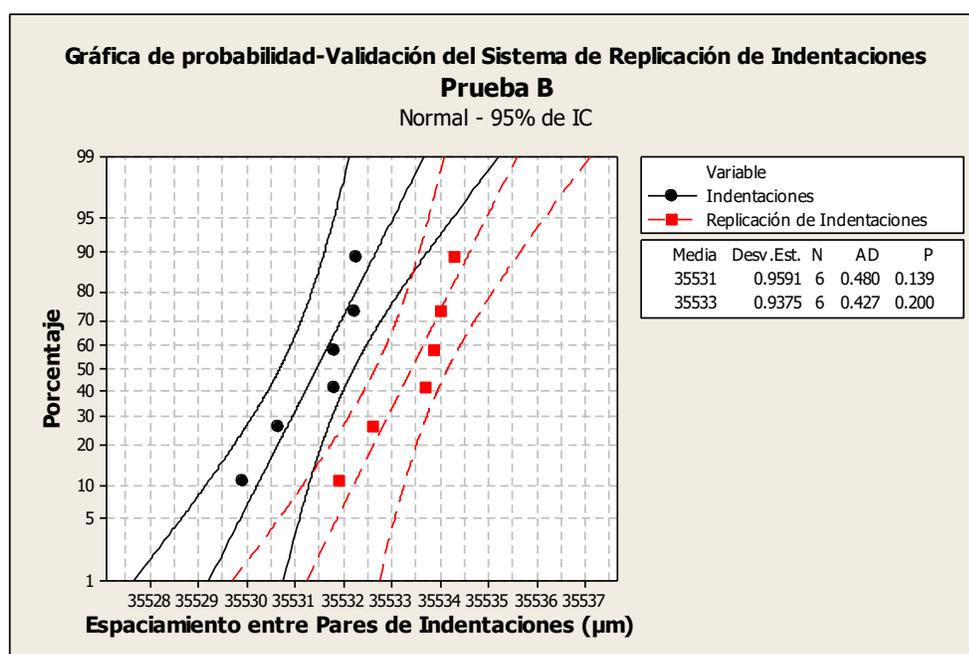


Figura 4.7. Gráfica de Probabilidad para la Validación del Sistema de Replicación de Indentaciones después del relevado de esfuerzos de la Prueba B.

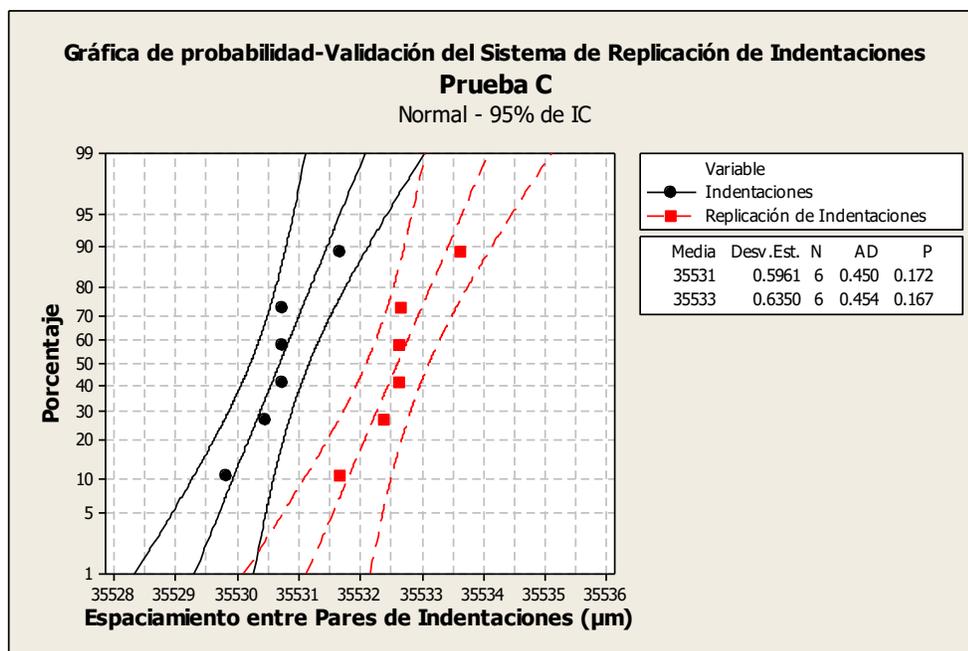


Figura 4.8. Gráfica de Probabilidad para la Validación del Sistema de Replicación de Indentaciones después del relevado de esfuerzos de la Prueba C.

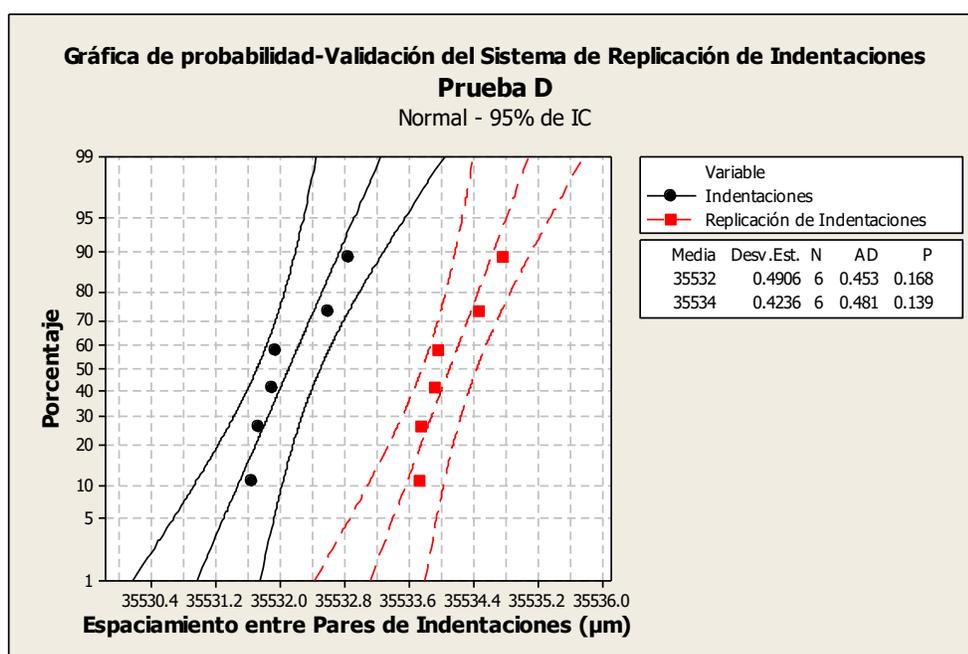


Figura 4.9. Gráfica de Probabilidad para la Validación del Sistema de Replicación de Indentaciones después del relevado de esfuerzos de la Prueba D.

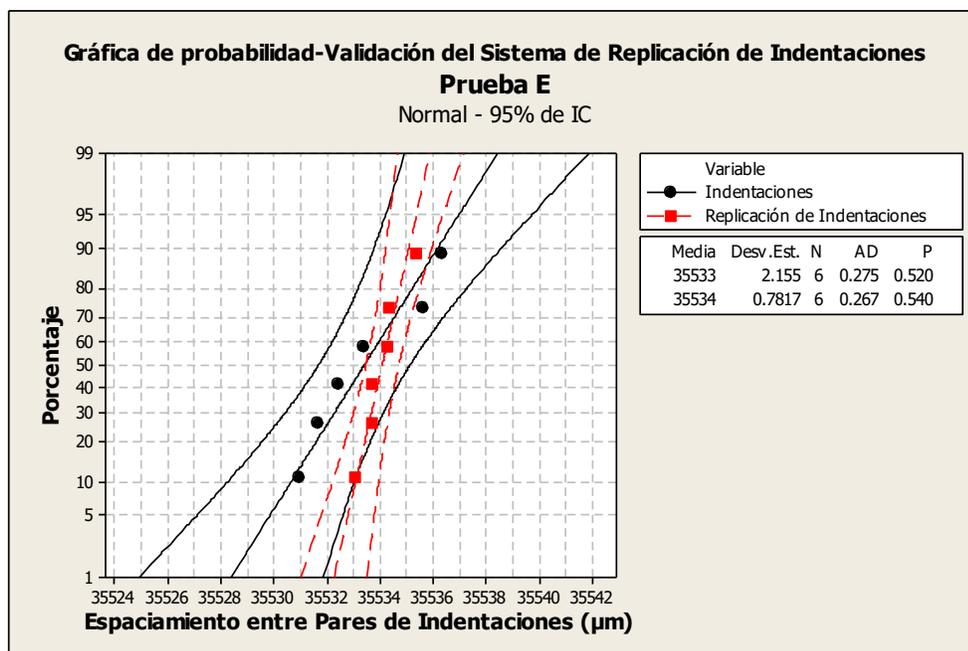


Figura 4.10. Gráfica de Probabilidad para la Validación del Sistema de Replicación de Indentaciones después del relevado de esfuerzos de la Prueba D.

❖ Medición de Esfuerzos Residuales para la Validación del Sistema de Replicación de Indentaciones

Se tomó lectura directa de la deformación longitudinal antes y después del relevado de esfuerzos, relacionando dicha deformación con los esfuerzos residuales mediante ley de Hooke (ecuación 4.1.). Las propiedades de la aleación de aluminio tipo A319 usadas para el cálculo son un módulo de Young (E) de 70,000 MPa y un límite de cedencia de 125 MPa [67].

$$\sigma = E (\varepsilon_0 - \varepsilon_1) \quad (4.1)$$

Los análisis estadísticos de los esfuerzos residuales en los puentes entre cilindros en cinco pruebas (A, B, C, D y E), generaron gráficas ayudando a estudiar los datos y validar sus resultados. A continuación se presentan dichos resultados:

❖ Prueba A

Los resultados obtenidos de la Prueba A mostraron que los esfuerzos residuales obtenidos se encontraban sometidos a tensión y presentaron una transferencia de las indentaciones en réplicas con una resolución $\approx +2 \mu\text{m}$ respecto a la medición directa de las indentaciones mediante el Sistema de Replicación de Indentaciones, esto traducido en esfuerzo es equivalente a 0.46 MPa, esa pequeña magnitud es estadísticamente insignificante. La Técnica de Replicación de Indentaciones tiene la sensibilidad a los esfuerzos residuales en los puentes entre cilindros, registrando una magnitud media del esfuerzo de 54.6 MPa (Tabla 4.4).

Tabla 4.4. Medición de esfuerzos residuales para la Validación del Sistema de Replicación de Indentaciones.

Prueba	Puente entre Cilindros	Indentaciones (MPa)	Replicación de Indentaciones (MPa)
A	1-3	54.52	54.96
	3-5	56.04	56.61
	5-7	53.54	53.87
	2-4	55.68	56.04
	4-6	52.06	52.57
	6-8	54.64	55.17

Realizando un análisis de la varianza (ANOVA) de los datos de la Prueba A se confirmó la hipótesis nula (h_0). En este caso, la hipótesis nula estableció que la variabilidad de las medias entre las mediciones de los esfuerzos residuales mediante la Técnica de Indentaciones (Apéndice A.2.) y la Técnica de Replicación de Indentaciones a 1.4 pulgadas (35.56 mm) (Apéndice A.3.) fue estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95.0% con un valor p mayor que el nivel $\alpha=0.05$ (Tabla 4.5.).

Tabla 4.5. Análisis de la varianza (ANOVA) de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba A.

ANOVA Prueba A	
Estadístico F	0.290
Valor- p	0.601
Desviación Estándar (Agrupada)	1.462
R-cuadrada (%)	2.840

La gráfica de valores individuales de la Prueba A al igual que la gráfica de caja, nos ayuda a identificar valores atípicos y la forma de la distribución, pero es única en el sentido de que grafica cada valor separadamente.

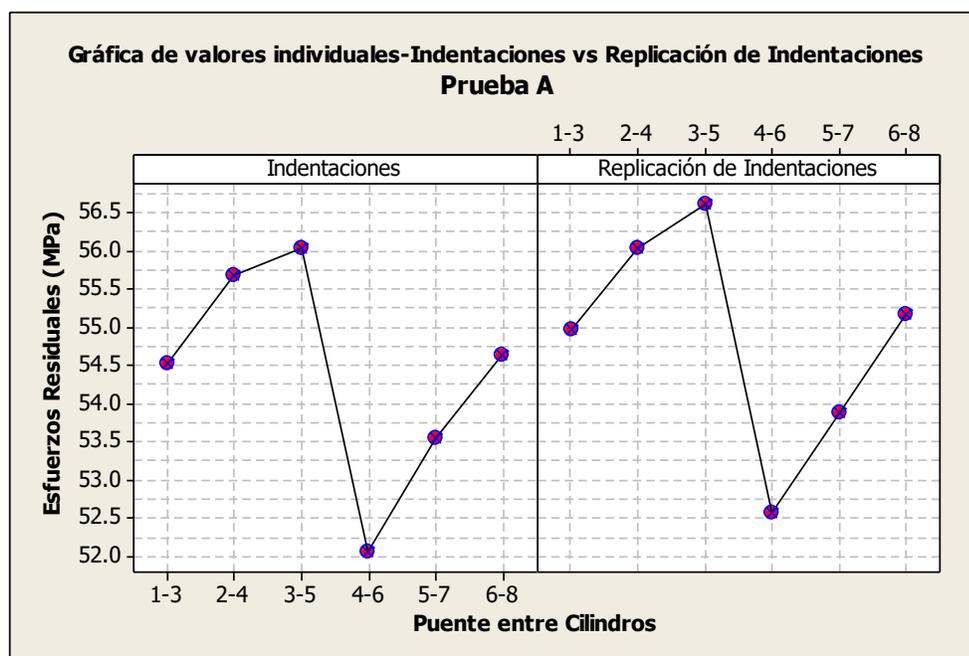


Figura 4.11. Gráfica de valores individuales de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba A.

En la Figura 4.12 y 4.13 se muestra las gráficas de cajas y de intervalos respectivamente; en ellas se muestran la distribución de la Prueba A. En la gráfica de caja se aprecia que no hay valores atípicos y el bigote inferior es más largo indican una asimetría negativa. La media de ambas técnicas son similares, sin embargo, las gráficas de caja de la Técnica de Replicación de Indentaciones muestran un aumento promedio en los esfuerzos residuales de 0.46 MPa respecto a la Técnica de Indentaciones.

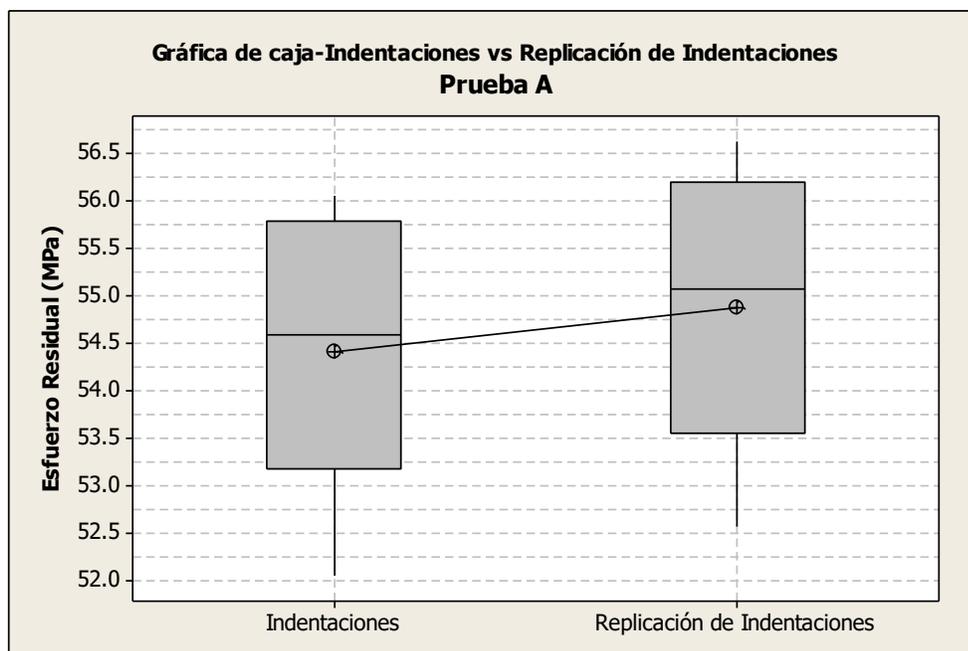


Figura 4.12. Gráfica de caja de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba A.

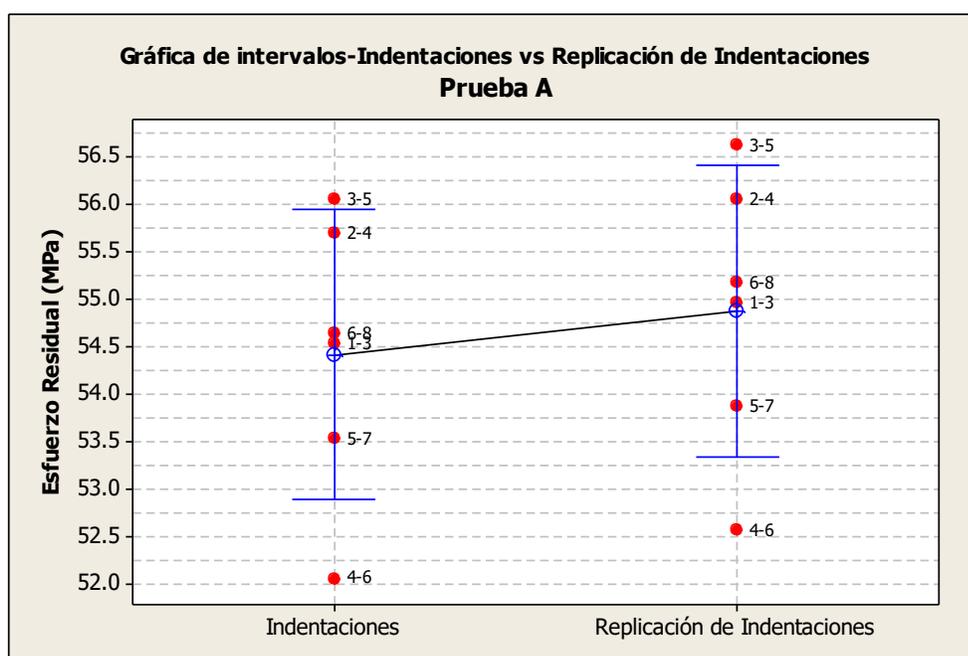


Figura 4.13. Gráfica de intervalos de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba A.

La gráfica de probabilidad (Figura 4.14.), muestra el ajuste de distribución de los esfuerzos residuales, así como, compara las diferentes distribuciones de las muestras de la Prueba A. Los puntos de datos aproximadamente siguen una línea recta, el valor p está por encima de 0.05 y el estadístico de Anderson-Darling es bajo. Por lo tanto, la distribución normal parece ajustarse bastante bien en ambas técnicas.

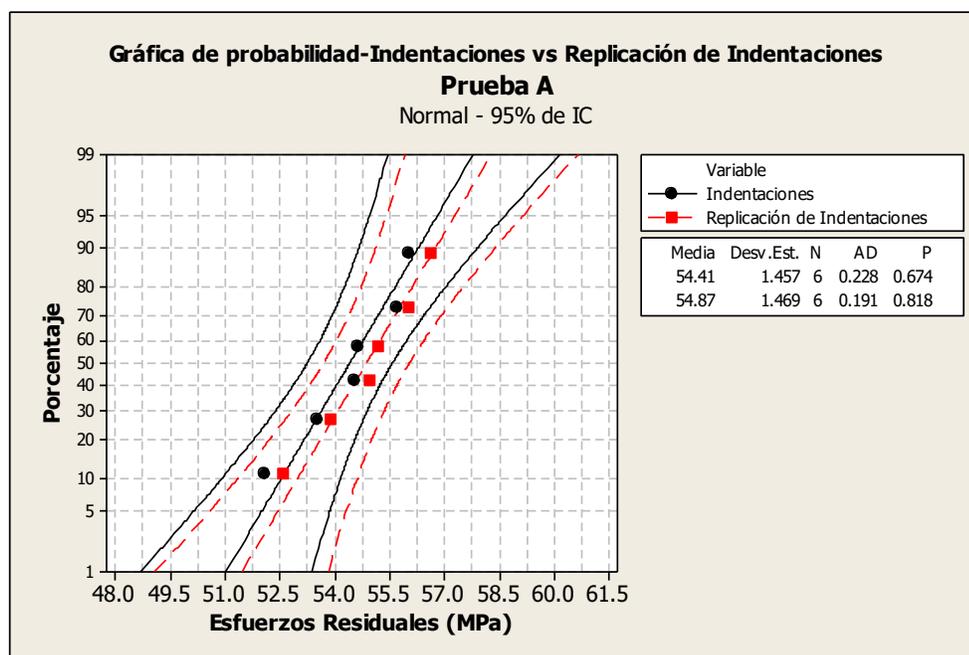


Figura 4.14. Distribución de probabilidad de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba A.

Bajo la premisa de que una muestra de mayor tamaño brinda mayor precisión, confianza y grado de variabilidad se realizó la preparación y medición de esfuerzos residuales en otros cuatro monobloques V8 de aluminio. Los resultados corroboran lo observado en la Prueba A. Estos resultados se muestran a continuación:

❖ Prueba B

Tabla 4.6. Medición de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones.

Prueba	Puente entre Cilindros	Indentaciones (MPa)	Replicación de Indentaciones (MPa)
B	1-3	47.44	48.24
	3-5	47.38	47.69
	5-7	48.30	48.56
	2-4	52.06	52.44
	4-6	48.30	48.89
	6-8	50.55	51.02

Tabla 4.7. Análisis de la varianza (ANOVA) de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba B.

ANOVA Prueba B	
Estadístico F	0.19
Valor-p	0.672
Desviación Estándar (Agrupada)	1.867
R-cuadrada (%)	1.860

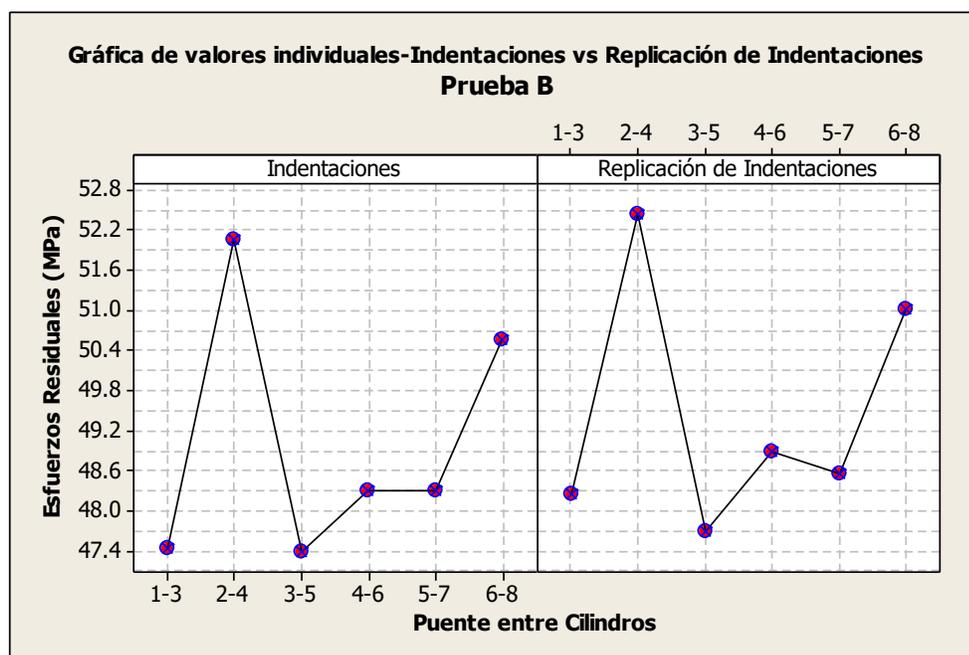


Figura 4.15. Gráfica de valores individuales de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba B.

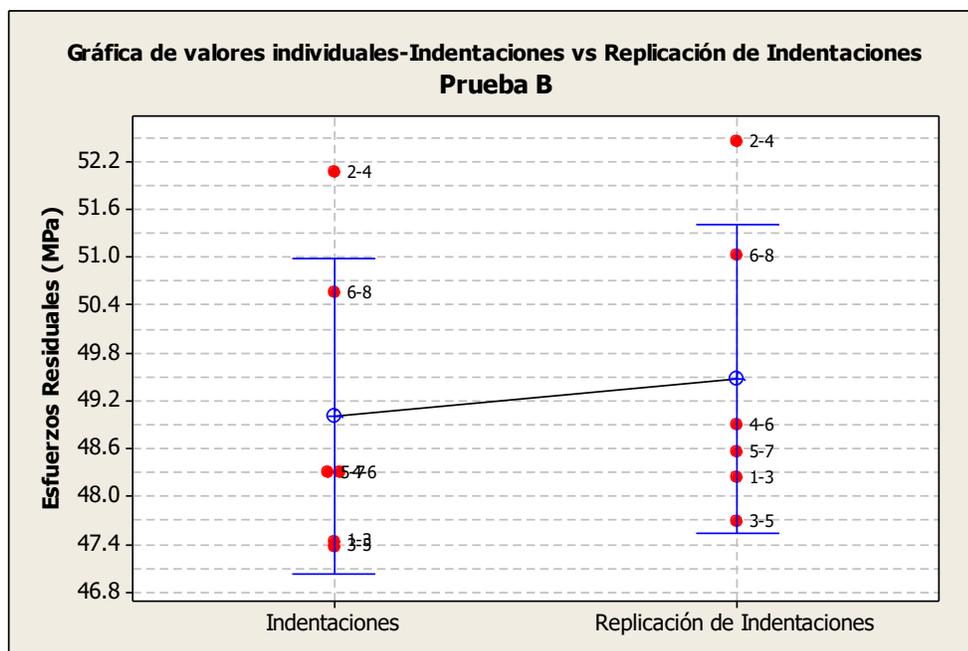


Figura 4.16. Gráfica de intervalos de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba B.

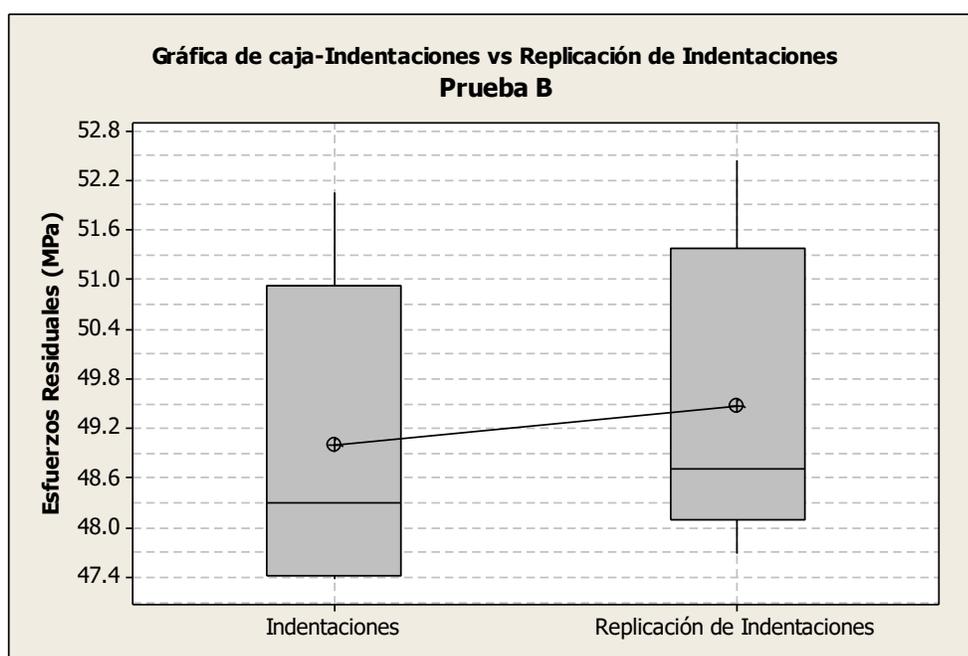


Figura 4.17. Gráfica de caja de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba B.

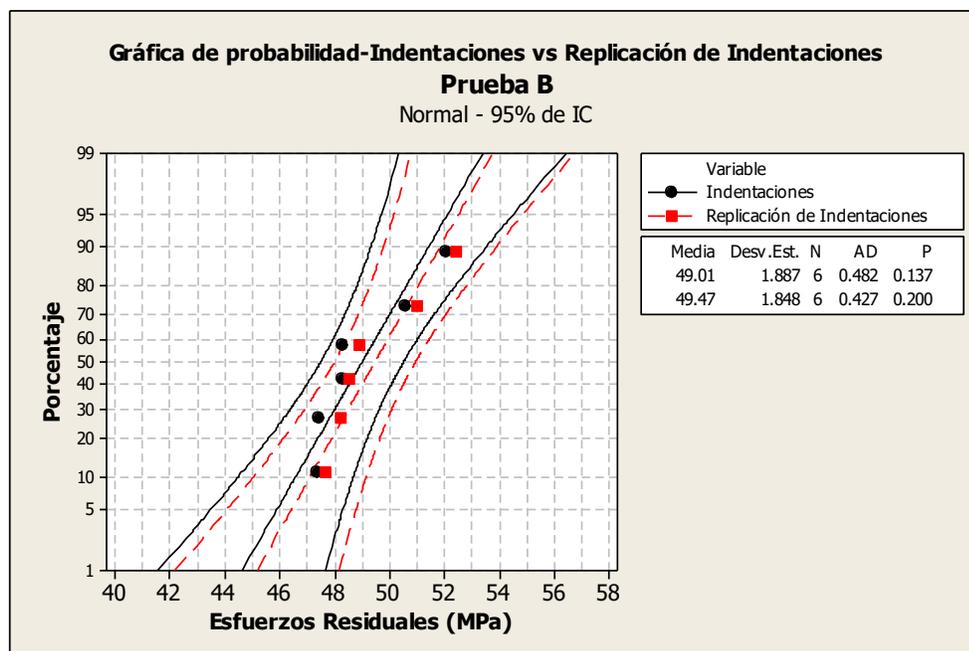


Figura 4.18. Distribución de probabilidad de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba B.

❖ Prueba C

Tabla 4.8. Medición de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones.

Prueba	Puente entre Cilindros	Indentaciones (MPa)	Replicación de Indentaciones (MPa)
C	1-3	52.20	52.93
	3-5	48.56	49.03
	5-7	50.45	50.96
	2-4	50.43	51.00
	4-6	50.43	51.00
	6-8	50.96	51.49

Tabla 4.9. Análisis de la varianza (ANOVA) de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba C.

ANOVA Prueba C	
Estadístico F	0.65
Valor-p	0.439
Desviación Estándar (Agrupada)	1.212
R-cuadrada (%)	6.11

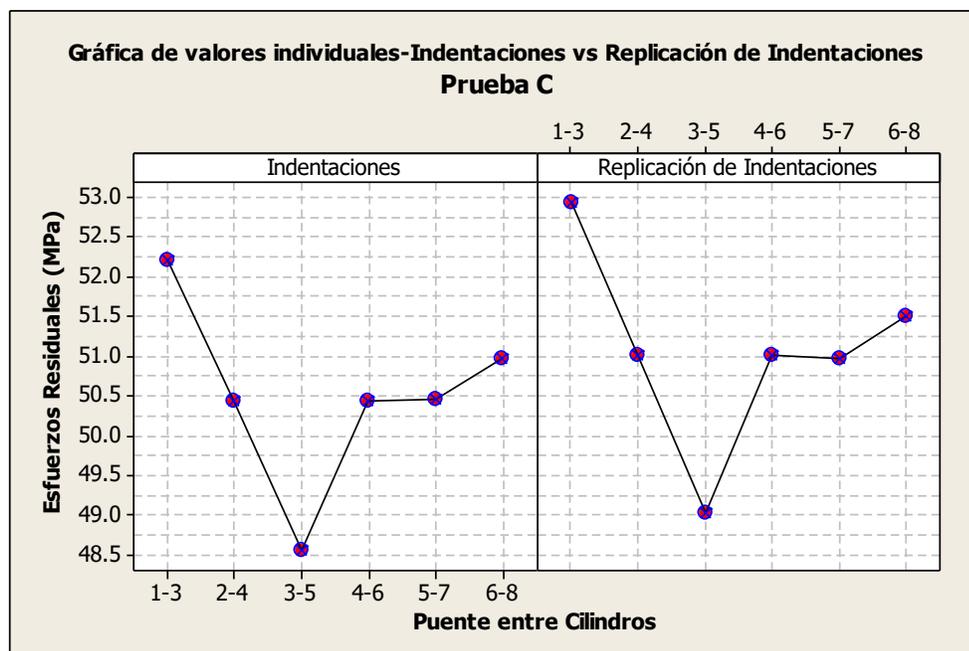


Figura 4.19. Gráfica de valores individuales de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba C.

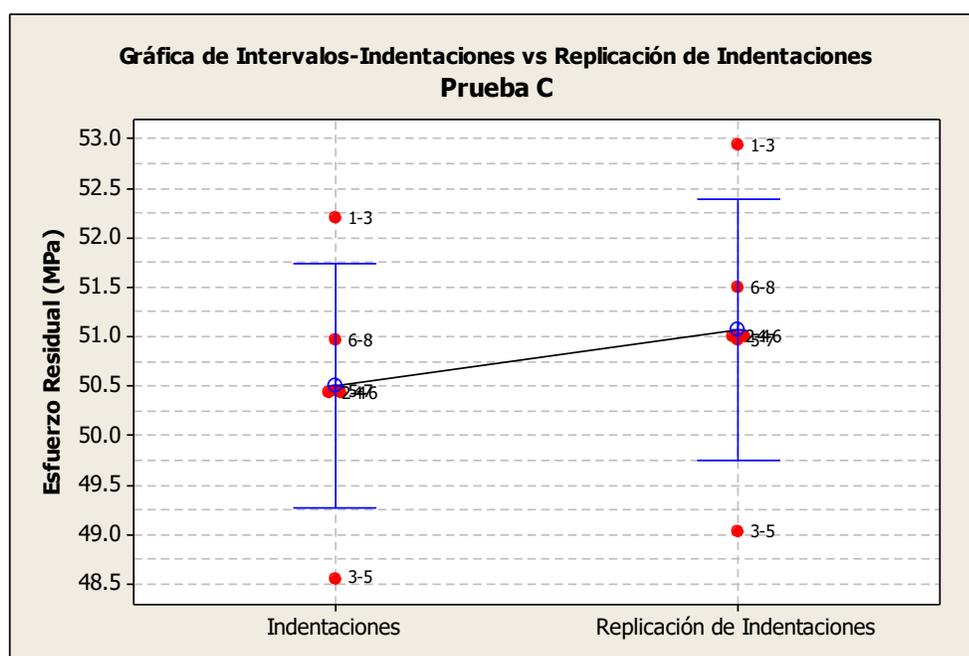


Figura 4.20. Gráfica de intervalos de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba C.

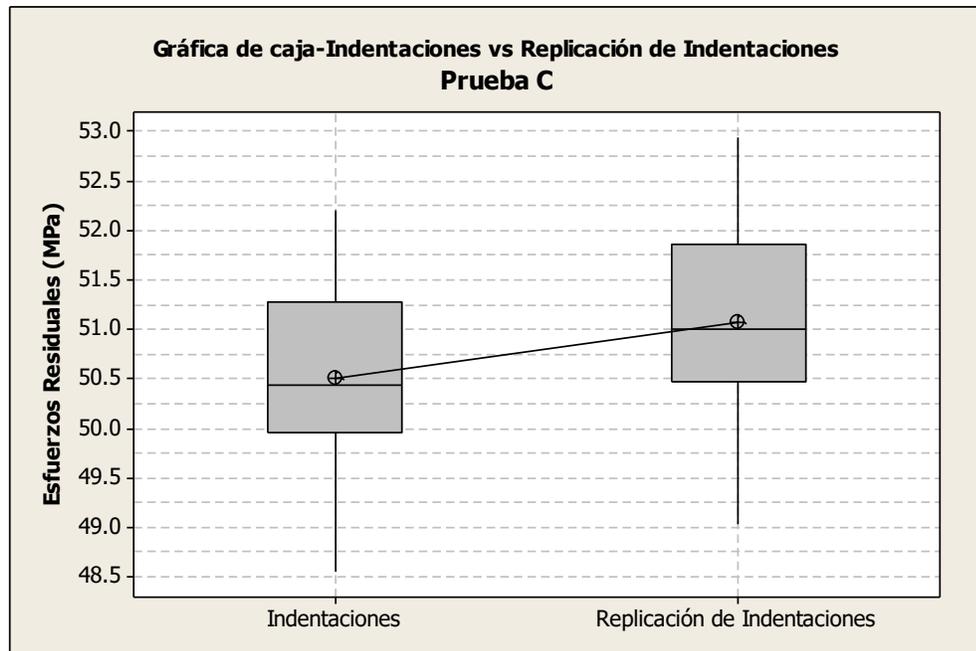


Figura 4.21. Gráfica de caja de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba C.

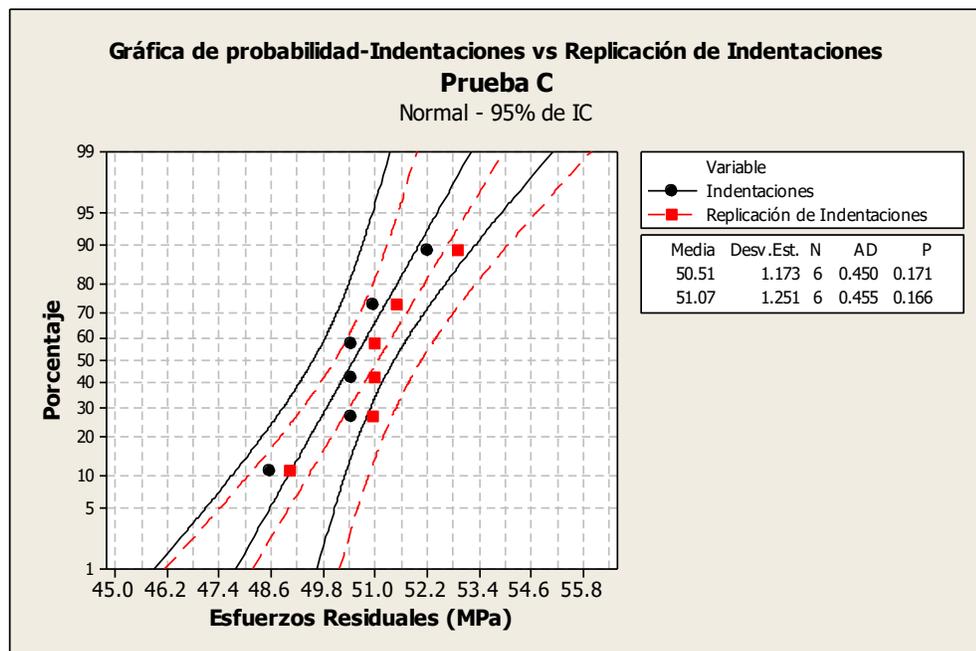


Figura 4.22. Distribución de probabilidad de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba C.

❖ Prueba D

Tabla 4.10. Medición de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba D.

Prueba	Puente entre Cilindros	Indentaciones (MPa)	Replicación de Indentaciones (MPa)
D	1-3	46.77	47.38
	3-5	48.13	48.40
	5-7	46.25	46.81
	2-4	48.03	48.48
	4-6	48.46	48.81
	6-8	48.62	48.83

Tabla 4.11. Análisis de la varianza (ANOVA) esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba D.

ANOVA Prueba D	
Estadístico F	0.62
Valor-p	0.449
Desviación Estándar (Agrupada)	0.9024
R-cuadrada (%)	5.84

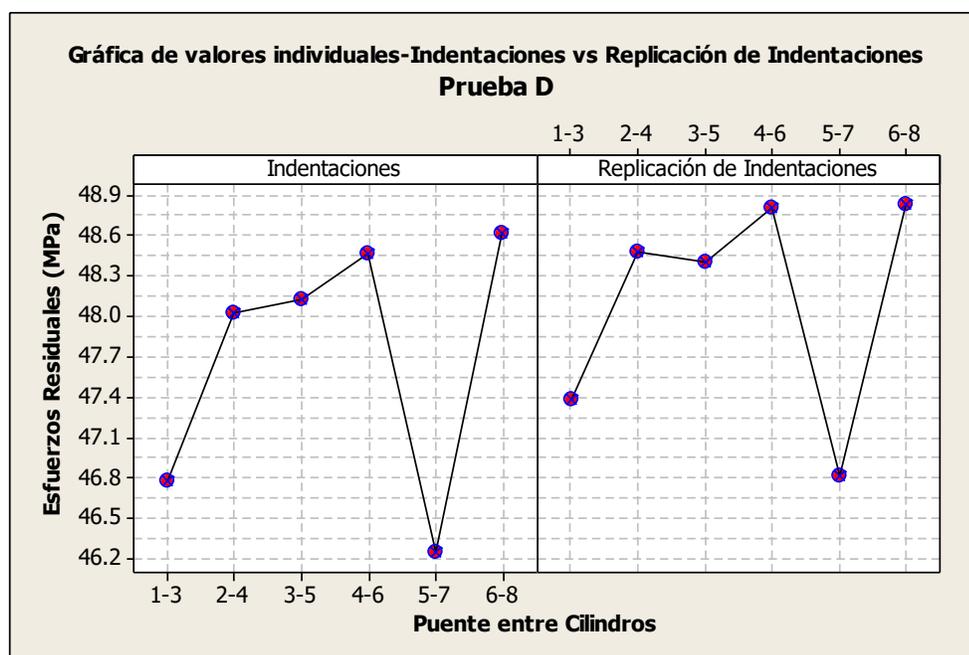


Figura 4.23. Gráfica de vales individuales esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba D.

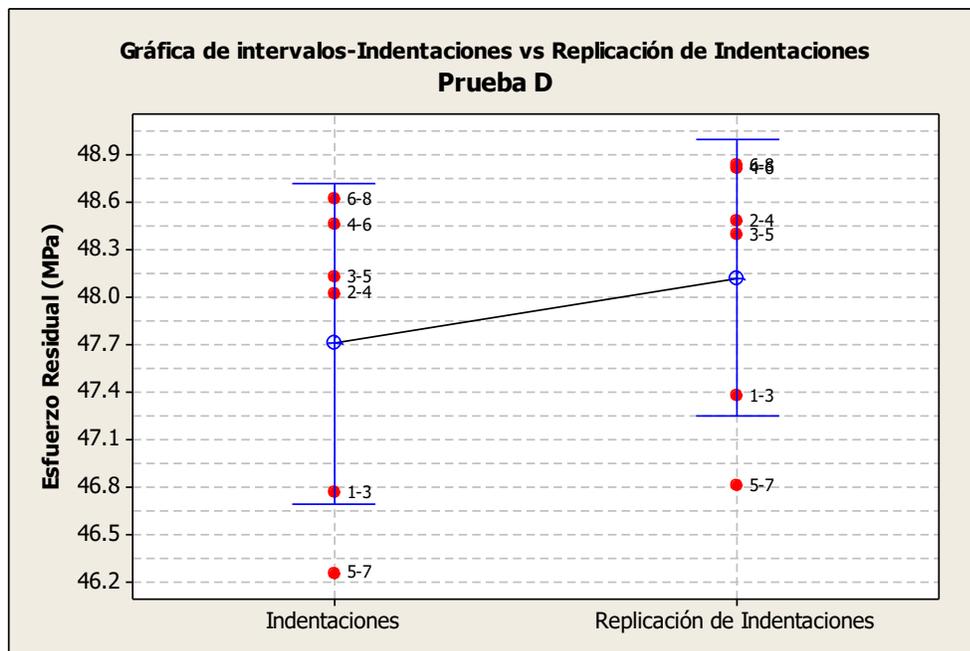


Figura 4.24. Gráfica de intervalos esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba D.

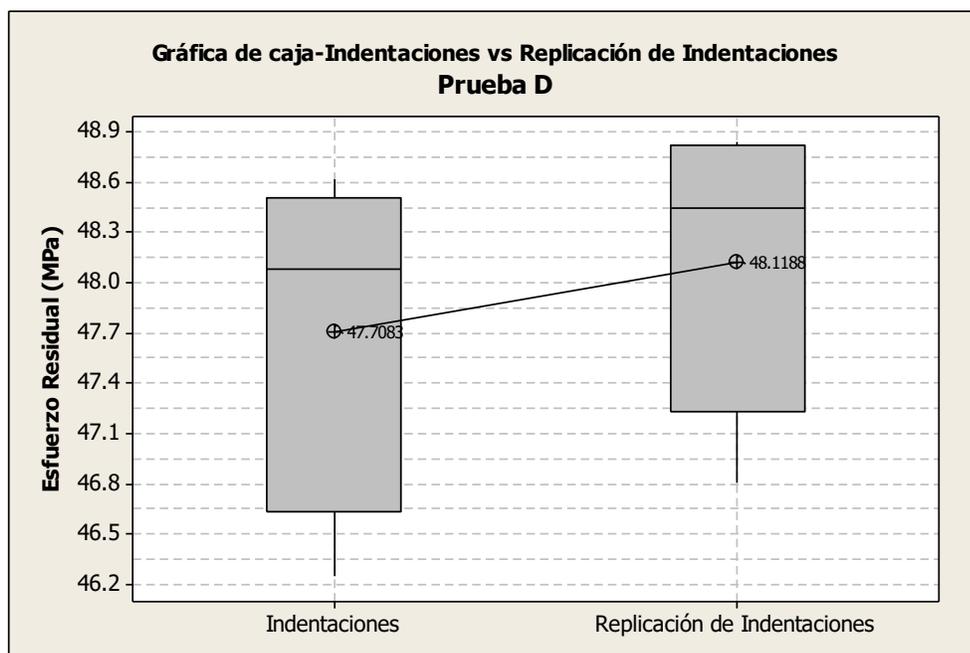


Figura 4.25. Gráfica de caja esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba D.

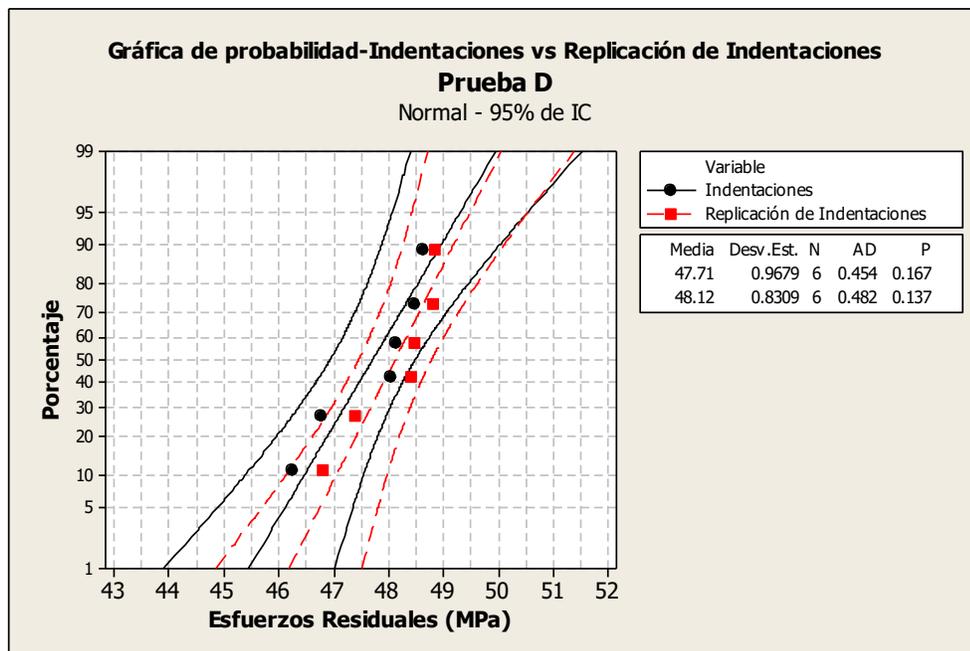


Figura 4.26. Distribución de probabilidad esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba D.

❖ Prueba E

Tabla 4.12. Medición de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba E.

Prueba	Puente entre Cilindros	Indentaciones (MPa)	Replicación de Indentaciones (MPa)
E	1-3	47.05	47.65
	3-5	48.56	48.85
	5-7	45.20	45.59
	2-4	49.67	50.11
	4-6	47.62	47.81
	6-8	48.44	48.89

Tabla 4.13. Análisis de la varianza (ANOVA) de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba E.

ANOVA Prueba E	
Estadístico F	0.20
Valor-p	0.667
Desviación Estándar (Agrupada)	1.538
R-cuadrada (%)	1.93

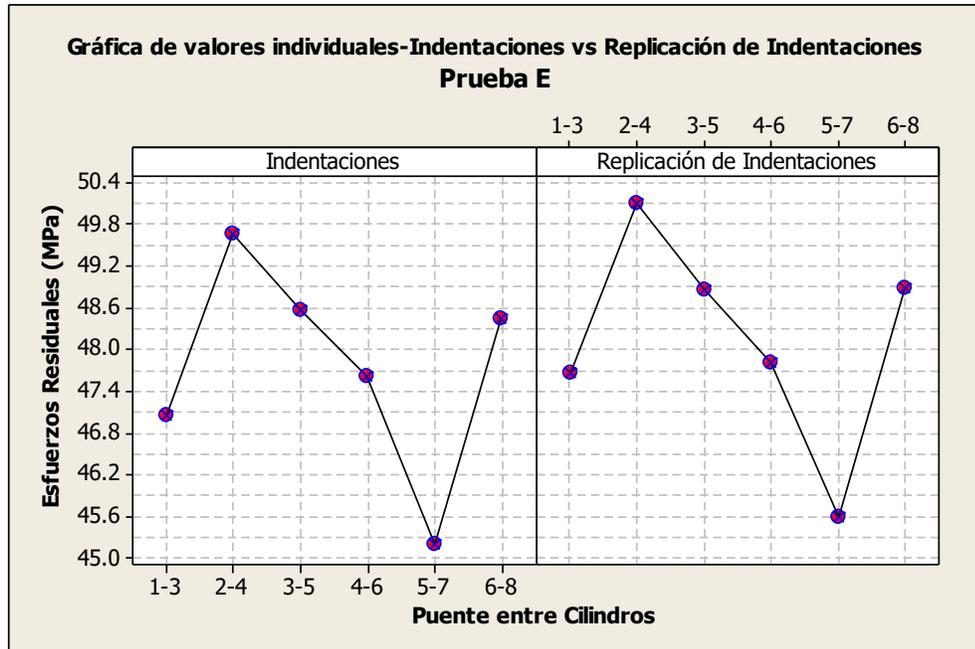


Figura 4.27. Gráfica de valores individuales de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba E.

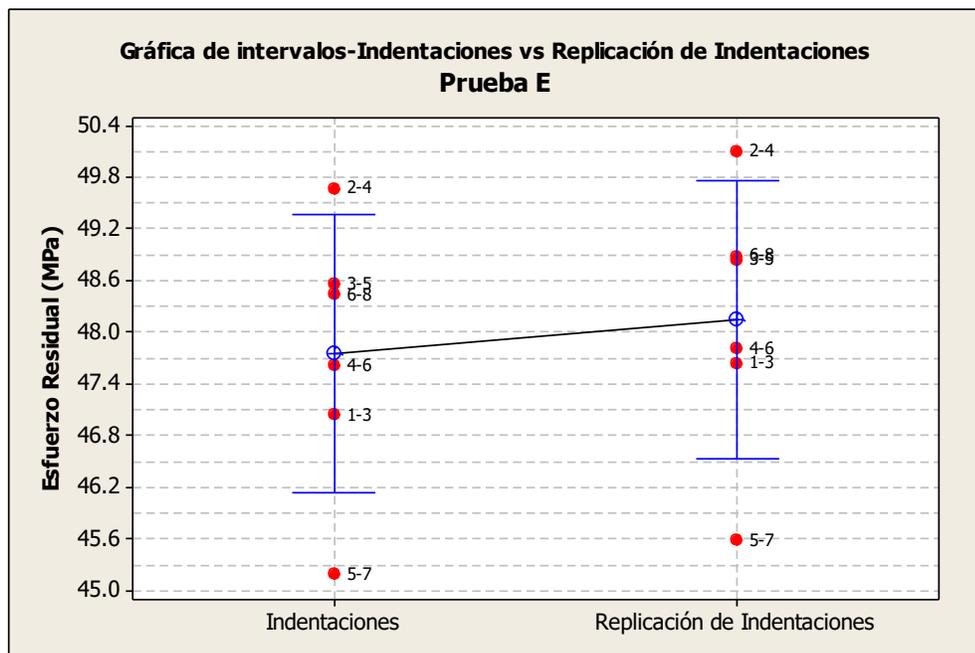


Figura 4.28. Gráfica de intervalos de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba E.

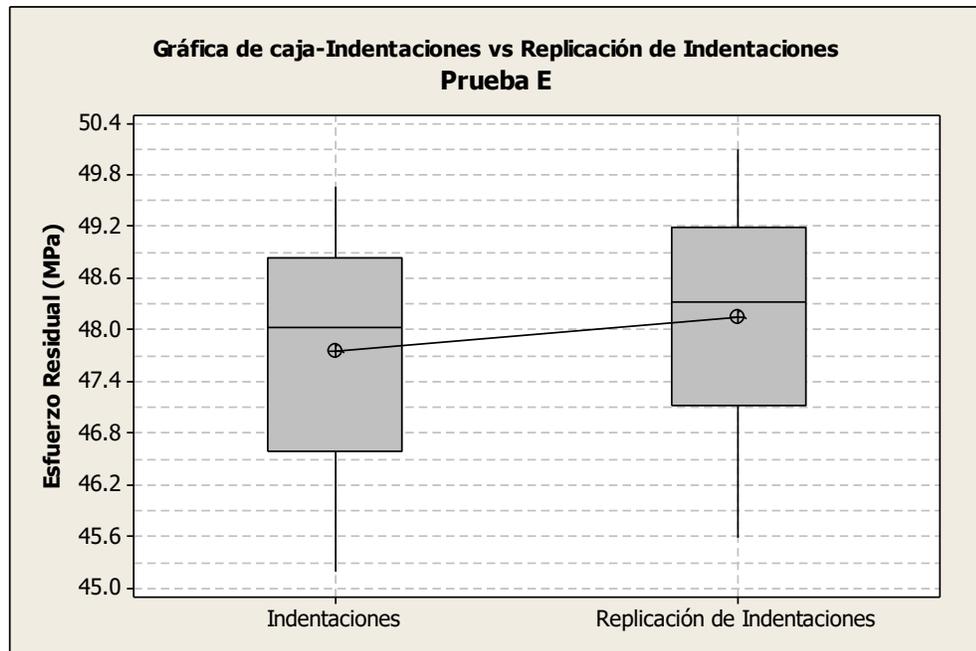


Figura 4.29. Gráfica de caja de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba E.

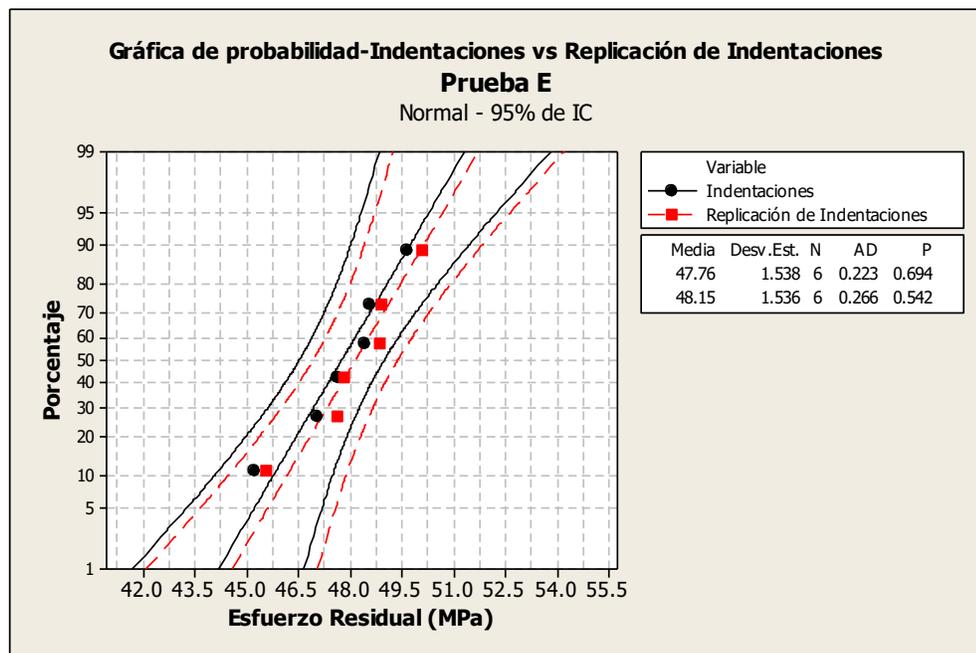


Figura 4.30. Distribución de probabilidad de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba E.

4.5. Medición de esfuerzos residuales

❖ Técnica de Galgas Extensométricas vs Técnica de Replicación de Indentaciones

La Técnica de Galgas Extensométricas en la medición de esfuerzos residuales detectó variaciones longitudinales extremadamente pequeñas y las convirtió en variaciones de resistencia eléctrica (Apéndice A.1.). Es un método destructivo, es necesario una superficie plana para su aplicación, es sensible a la degradación térmica, tiene señales de salida relativamente bajas, se requiere de personal capacitado y un procedimiento cuidadoso en la instrumentación demandando mucho tiempo, se debe de realizar en un lugar en condiciones de humedad y temperatura controladas. En contraste, la Técnica de Replicación de Indentaciones, tomó lectura directa de la deformación longitudinal mediante el uso de microscopía óptica antes y después de un relevado de esfuerzos (Apéndice A.3.), relacionando dicha deformación con los esfuerzos residuales mediante la ley de Hooke (ecuación 4.1). Las propiedades de la aleación de aluminio tipo A319 usadas para el cálculo son un módulo de Young (E) de 70,000 MPa y un límite de cedencia de 125 MPa ^[67].

$$\sigma = E (\varepsilon_0 - \varepsilon_1) \quad (4.1)$$

Se realizó la medición de los esfuerzos residuales mediante ambas técnicas en cinco monobloques V8 de aluminio (Pruebas: A, B, C, D, y E), los resultados revelaron que la magnitud de los esfuerzos residuales evaluados mediante la Técnica de Galgas Extensométricas fue de magnitud mayor que los obtenidos mediante la Técnica de Replicación de Indentaciones a 1.4 pulgadas (Figura 4.31.a.) tomando como referencia el centro de los puentes entre cilindros (Figura 4.1.a.). Esta diferencia se presenta en las cinco pruebas realizadas, señalando que la zona donde se realizaron los pares de indentaciones presentó una menor deformación debido una distribución del esfuerzo en una mayor área como se aprecia en la Figura 4.1.b.

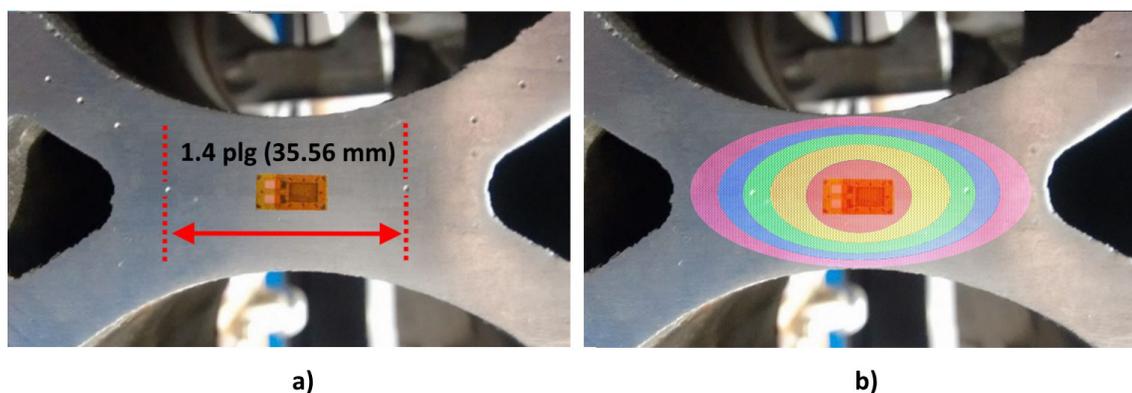


Figura 4.31. a) Distancia entre indentaciones, b) Campo de esfuerzos en los puentes entre cilindros.

❖ Distribución de Probabilidad de los esfuerzos residuales

Las distribuciones de probabilidad de los cinco monobloques se muestran en la Tabla 4.13., ésta nos permitió evaluar de manera individual el ajuste de distribución de ambas técnicas en cada prueba. El valor p está por encima de 0.05 y el estadístico de Anderson-Darling es bajo. Por lo tanto, la distribución normal parece ajustarse bastante bien a los datos de la muestra en las cinco pruebas realizadas.

Tabla 4.14. Valores de la distribución de probabilidad de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y la técnica de replicación de indentaciones a 1.4 pulgadas.

Técnica	Prueba	Media de Esfuerzos residuales (MPa)	Desviación Estándar	Anderson Darling	Valor- ρ
Galgas Extensométricas	A	79.84	1.54	0.134	0.950
	B	72.37	0.65	0.199	0.789
	C	77.21	3.51	0.291	0.483
	D	70.83	4.06	0.158	0.903
	E	68.34	1.27	0.373	0.288
Replicación de Indentaciones	A	54.87	1.47	0.189	0.822
	B	50.25	1.85	0.427	0.200
	C	51.07	1.25	0.454	0.167
	D	48.12	0.83	0.481	0.139
	E	48.15	1.54	0.267	0.540

❖ Prueba A

Los resultados obtenidos de la Prueba A se presentan en la Tabla 4.14. La media de los esfuerzos evaluados mediante la Técnica de Replicación de Indentaciones a 1.4 pulgadas (35.56 mm) fue de 54.87 MPa y mediante la Técnica de Galgas Extensométricas fue 79.94 MPa (Tabla 4.14.). La diferencia entre ambas técnicas es 24.96 MPa, ésta diferencia en magnitud de esfuerzo es debido a que la zona donde se realizaron los pares de huellas presentó una menor deformación debido una distribución del esfuerzo en una mayor área como se aprecia en la Figura 4.1.b.

Tabla 4.15. Medición de esfuerzos residuales de la Prueba A.

Prueba	Puente entre Cilindros	Galgas Extensométricas (MPa)	Replicación de Indentaciones (MPa)
A	1-3	80.78	54.96
	3-5	79.38	56.61
	5-7	78.89	53.87
	2-4	77.77	56.04
	4-6	80.01	52.57
	6-8	82.18	55.17

Realizando un análisis de la varianza (ANOVA) de los datos de la Prueba A (Tabla 4.16.), no se confirma la hipótesis nula (h_0). En este caso, se rechaza la hipótesis nula que establecía que la variabilidad de las medias entre las mediciones de los esfuerzos residuales mediante la Técnica de Indentaciones y la Técnica de Replicación de Indentaciones a 1.4 pulgadas (35.56 mm) fuera estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95.0% con un valor p mayor que el nivel $\alpha=0.05$ (Tabla 4.15.).

Tabla 4.16. Análisis de la varianza (ANOVA) de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y la técnica de replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba A.

Prueba A (ANOVA)	
<i>Estadístico F</i>	828.37
<i>Valor-p</i>	0.000
Desviación Estándar (Agrupada)	1.502
R-cuadrada (%)	98.81

La gráfica de valores individuales de la Prueba A al igual que la gráfica de caja, nos ayudó a identificar valores atípicos y forma de la distribución de los esfuerzos mediante ambas técnicas, pero es única en el sentido de que grafica cada valor separadamente. En ella podemos apreciar que la magnitud de los esfuerzos residuales evaluados mediante la Técnica de Galgas Extensométricas es de magnitud mayor que la Técnica de Replicación de Indentaciones (Figura 4.32).

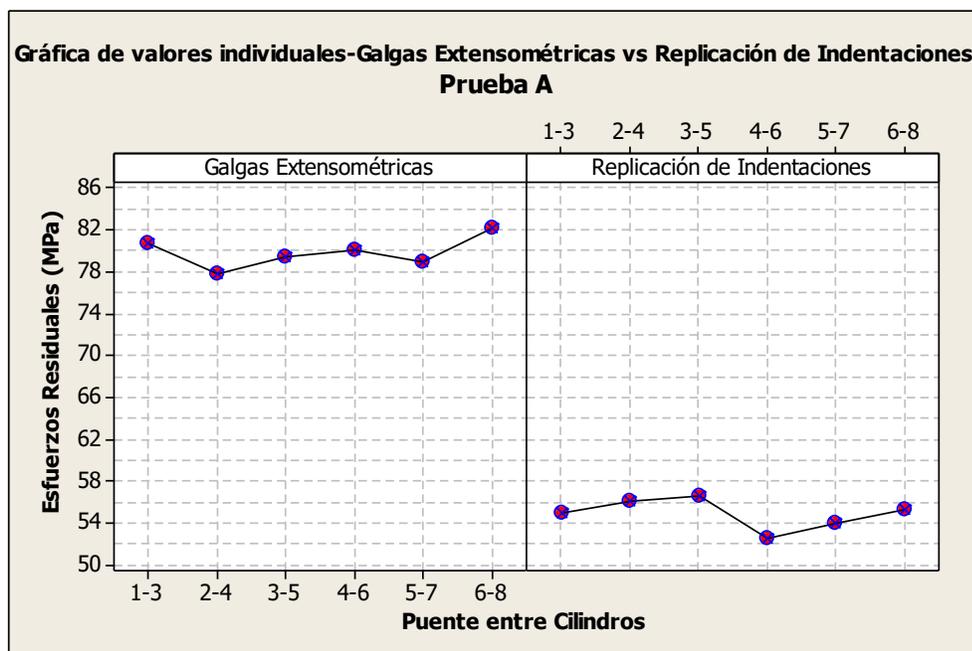


Figura 4.32. Gráfica de valores individuales de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba A.

En la Figura 4.33 y 4.34., se muestra las gráficas de intervalos y de caja respectivamente; en ellas se muestran la distribución de la Prueba A. En la gráfica de caja se aprecia que no hay valores atípicos y los bigotes indican simetría. Sin embargo, la diferencia entre las medias es de 24.96 MPa entre ambas técnicas. Donde la ecuación de regresión es: Replicación de Indentaciones = 67.6 - 0.159 (Galga Extensométrica).

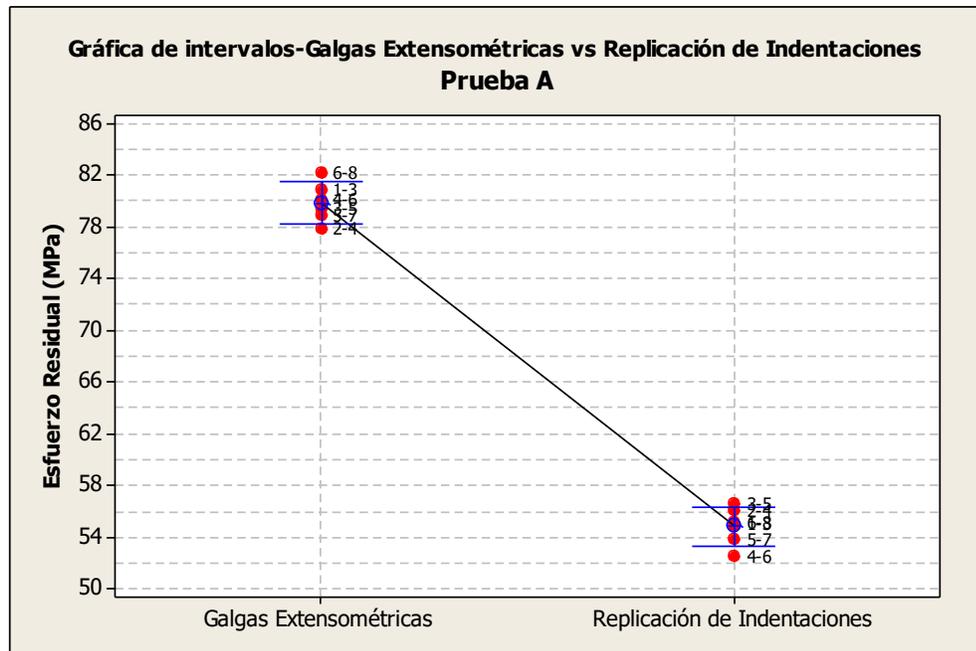


Figura 4.33. Gráfica de intervalos de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba A.

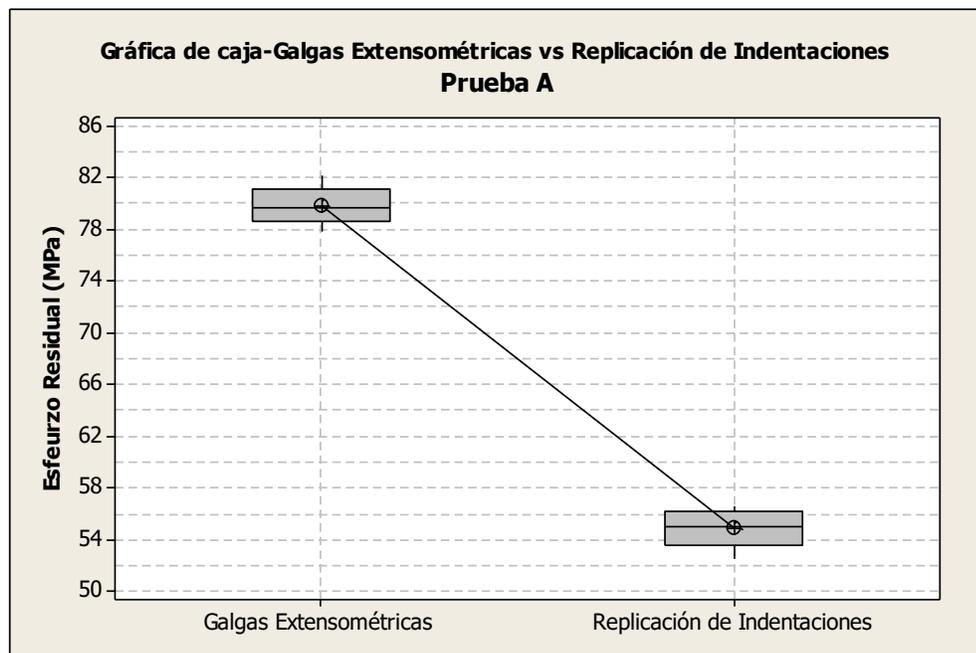


Figura 4.34. Gráfica de caja de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba A.

La gráfica de probabilidad (Figura 4.35.), muestra el ajuste de la distribución de los esfuerzos residuales de la Prueba A. Los puntos de datos aproximadamente siguen una línea recta, el valor p está por encima de 0.05 y el estadístico de Anderson-Darling es bajo. Por lo tanto, la distribución normal parece ajustarse bastante bien a los datos de la muestra en ambas técnicas.

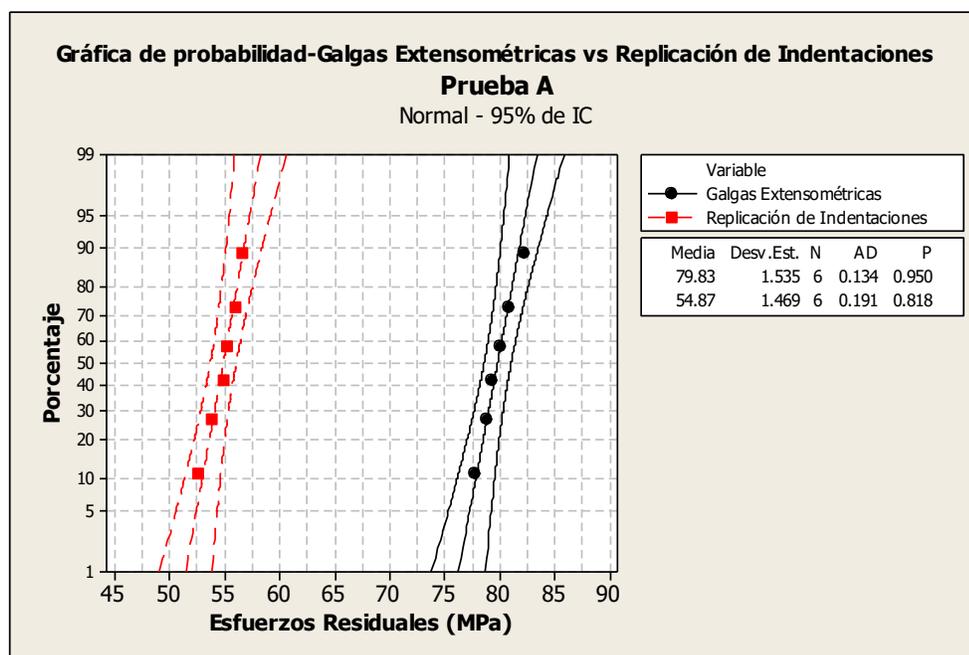


Figura 4.35. Distribución de probabilidad de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba A.

Los estudios previos realizados refuerzan la necesidad de realizar un mapeo superficial de los esfuerzos residuales en distintas zonas a lo largo de los puentes entre cilindros con el fin de poder obtener pautas de comportamiento y la distribución del estado de los esfuerzos a lo largo de los puntos del puente entre cilindros. Si el estado de esfuerzo es diferente en todos los puntos, se dice que el campo de esfuerzos es heterogéneo.

Bajo la premisa de que una muestra de mayor tamaño brinda mayor precisión, confianza y grado de variabilidad se realizó la preparación y medición de esfuerzos residuales en otros cuatro monobloques V8 de aluminio. Los resultados corroboran lo planeado en la Prueba A. Estos resultados se muestran a continuación:

❖ Prueba B

Tabla 4.17. Medición de esfuerzos residuales mediante la Técnica de Galgas Extensométricas y la Técnica de Replicación de Indentaciones a 1.4 pulgadas (35.56 mm) de la Prueba B.

Prueba	Puente entre Cilindros	Galgas Extensométricas (MPa)	Replicación de Indentaciones (MPa)
B	1-3	73.15	48.24
	3-5	72.59	47.69
	5-7	72.03	48.56
	2-4	71.40	52.44
	4-6	72.10	48.89
	6-8	72.94	51.02

Tabla 4.18. Análisis de la varianza (ANOVA) de esfuerzos residuales mediante la Técnica de Galgas Extensométricas y la Técnica de Replicación de Indentaciones utilizando un punzón de centros calibrado a 1.4 pulgadas de la Prueba B.

ANOVA Prueba B	
<i>Estadístico F</i>	828.37
<i>Valor-p</i>	0.000
Desviación Estándar (Agrupada)	1.502
R-cuadrada (%)	98.81
R-cuadrada ajustada (%)	98.69

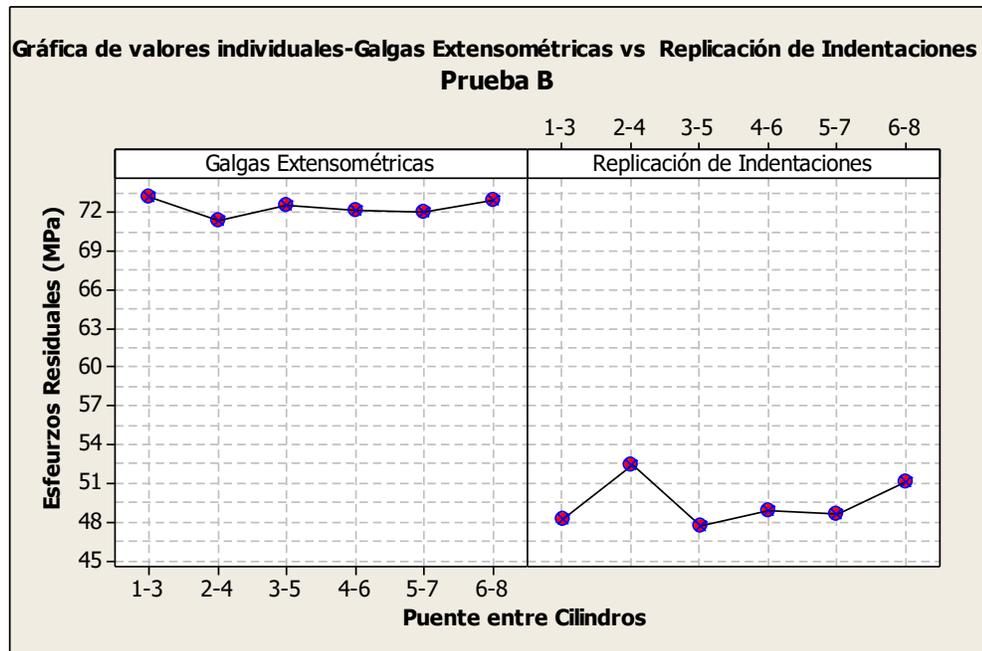


Figura 4.36. Gráfica de valores individuales de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba B.

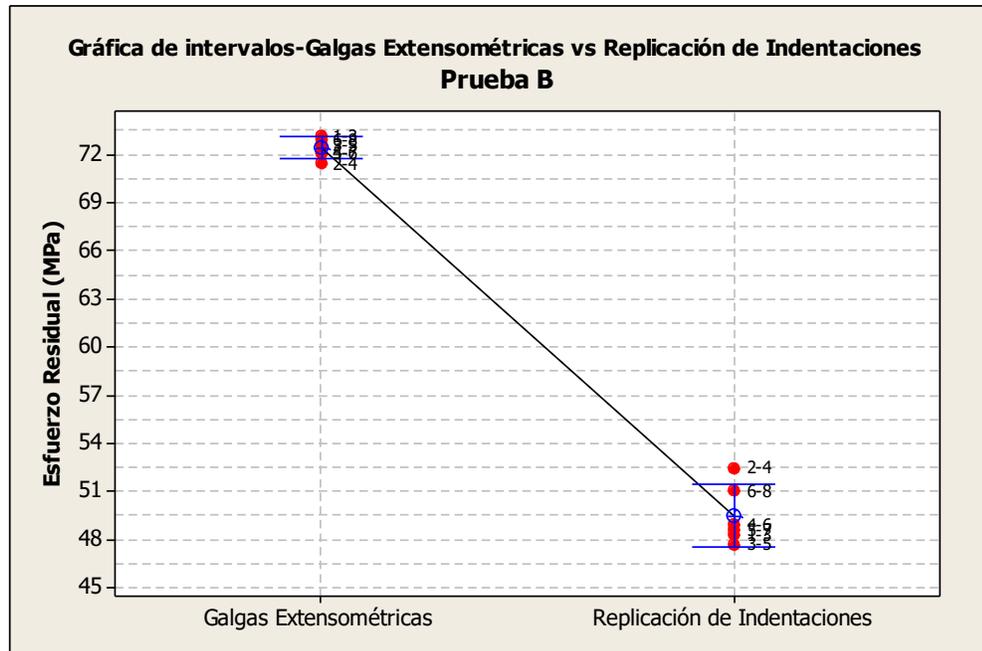


Figura 4.37. Gráfica de intervalos de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba B.

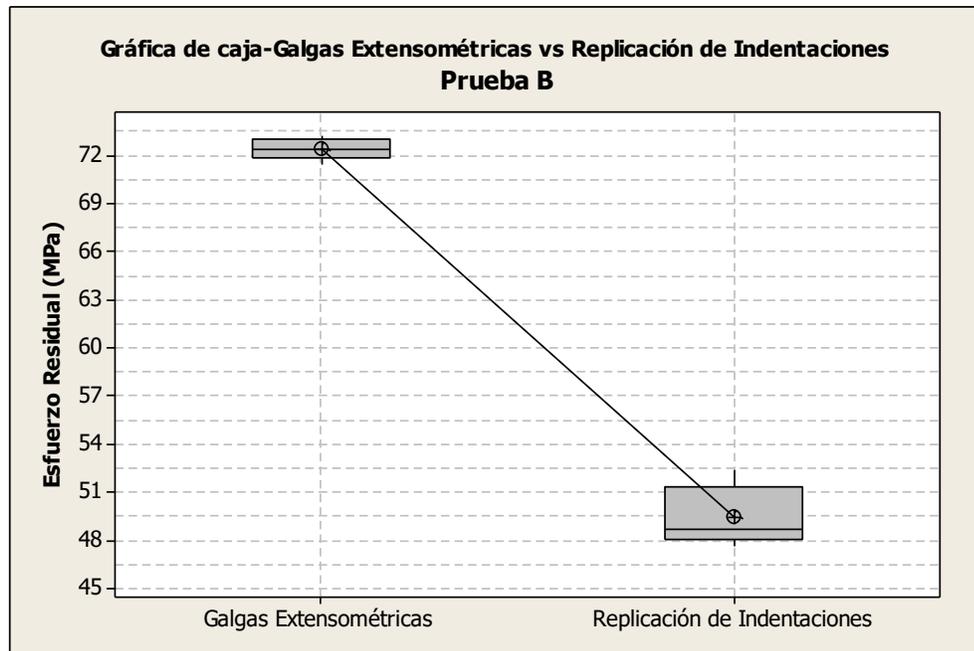


Figura 4.38. Gráfica de caja de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba B.

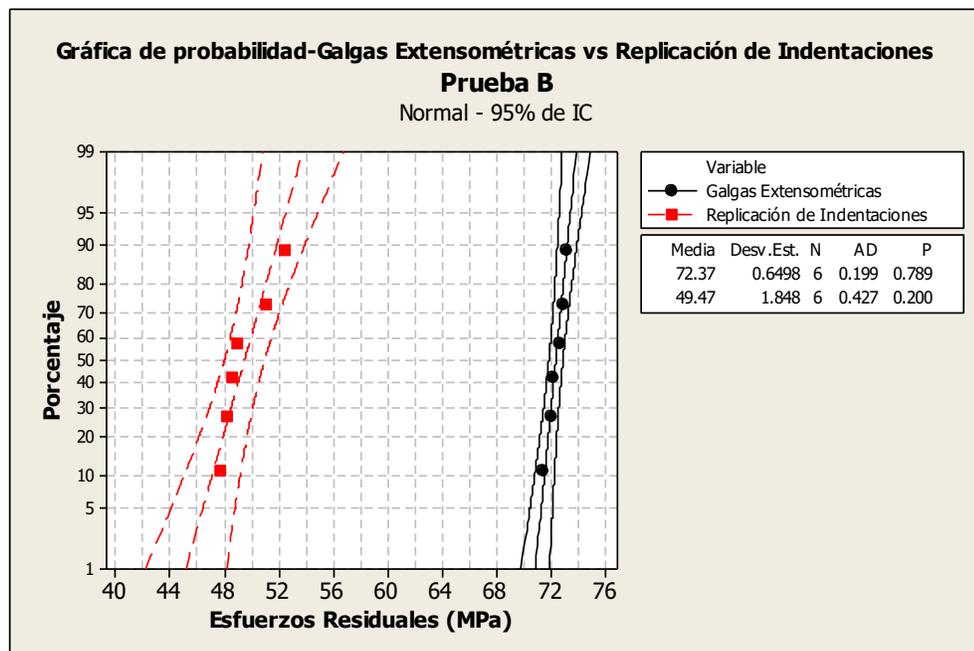


Figura 4.39. Distribución de probabilidad de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba B.

❖ Prueba C

Tabla 4.19. Medición de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y la técnica de replicación de indentaciones a 1.4 pulgadas (35.56 mm) de la Prueba E.

Prueba	Puente entre Cilindros	Galgas Extensométricas (MPa)	Replicación de Indentaciones (MPa)
C	1-3	77.91	52.93
	3-5	78.05	49.03
	5-7	82.81	50.96
	2-4	72.03	51.00
	4-6	76.51	51.00
	6-8	75.95	51.49

Tabla 4.20 Análisis de la varianza (ANOVA) de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba C.

ANOVA Prueba C	
<i>Estadístico F</i>	295.93
<i>Valor-p</i>	0.000
Desviación Estándar (Agrupada)	2.632
R-cuadrada (%)	96.73

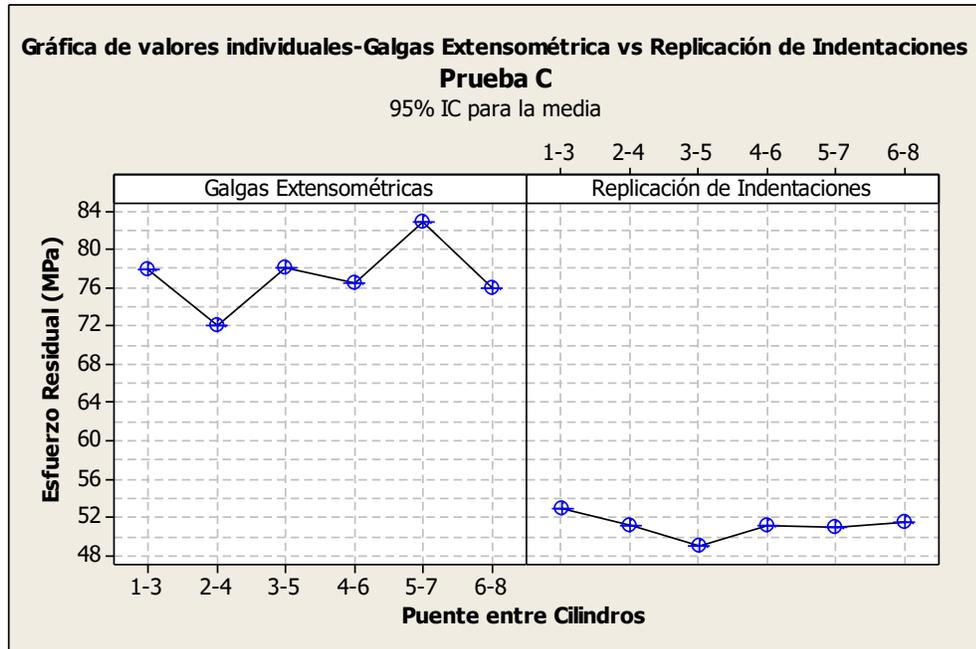


Figura 4.40. Gráfica de valores individuales de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba C.

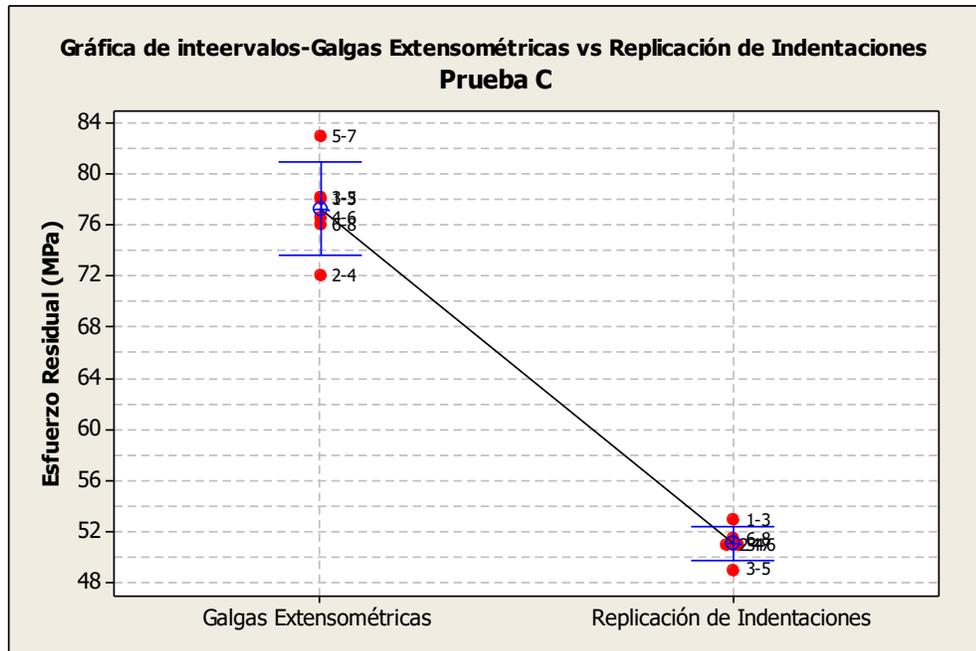


Figura 4.41. Gráfica de intervalos individuales de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba C.

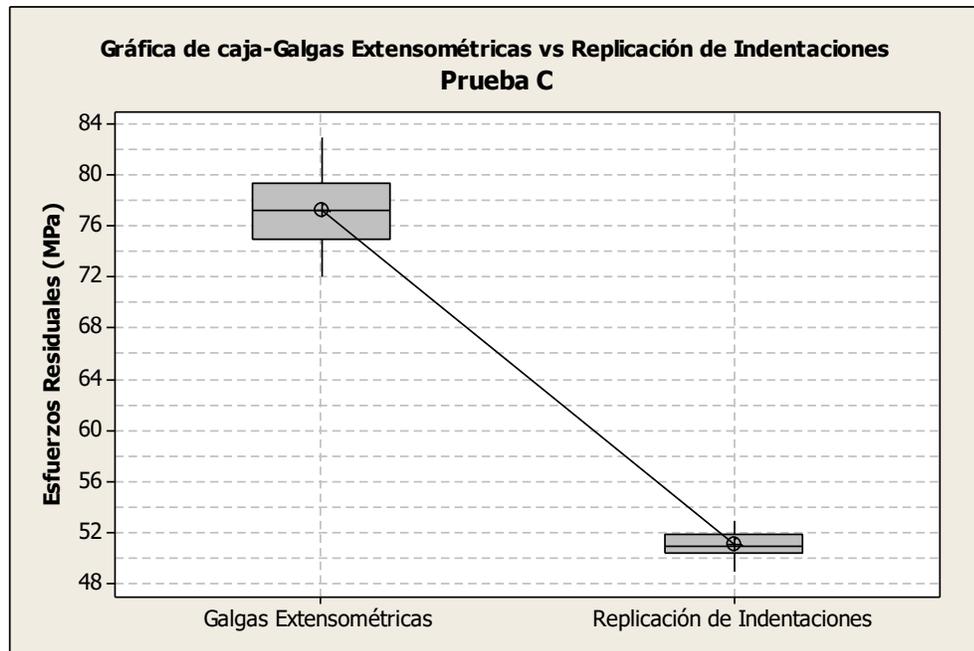


Figura 4.42. Gráfica de caja de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba C.

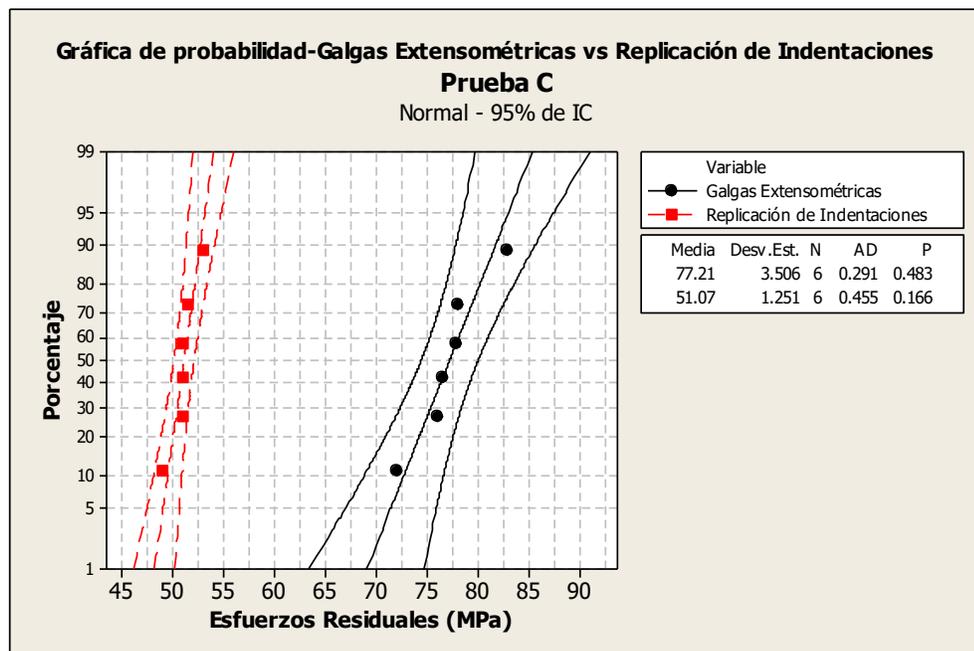


Figura 4.43. Distribución de probabilidad de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba C.

❖ Prueba D

Tabla 4.21. Medición de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y la técnica de replicación de indentaciones a 1.4 pulgadas (35.56 mm) de la Prueba D.

Prueba	Puente entre Cilindros	Galgas Extensométricas (MPa)	Replicación de Indentaciones (MPa)
D	1-3	69.86	47.38
	3-5	76.37	48.40
	5-7	74.27	46.81
	2-4	65.73	48.48
	4-6	67.27	48.81
	6-8	71.47	48.83

Figura 4.22. Análisis de la varianza (ANOVA) de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba D.

ANOVA Prueba D	
<i>Estadístico F</i>	179.83
<i>Valor-p</i>	0.000
Desviación Estándar (Agrupada)	2.933
R-cuadrada (%)	94.73
R-cuadrada ajustada (%)	94.21

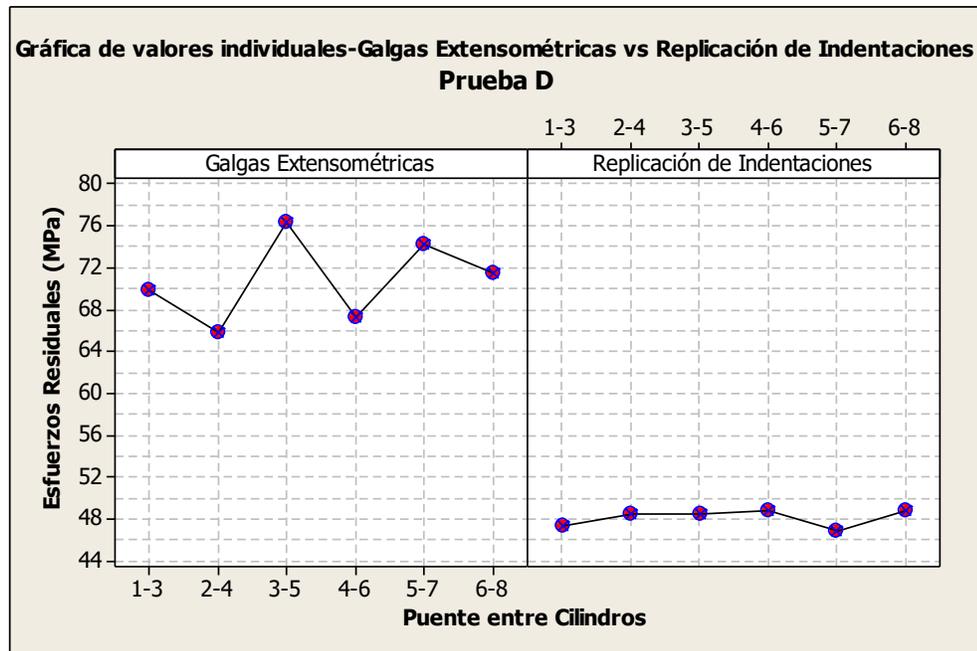


Figura 4.44. Gráfica de valores individuales de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba D.

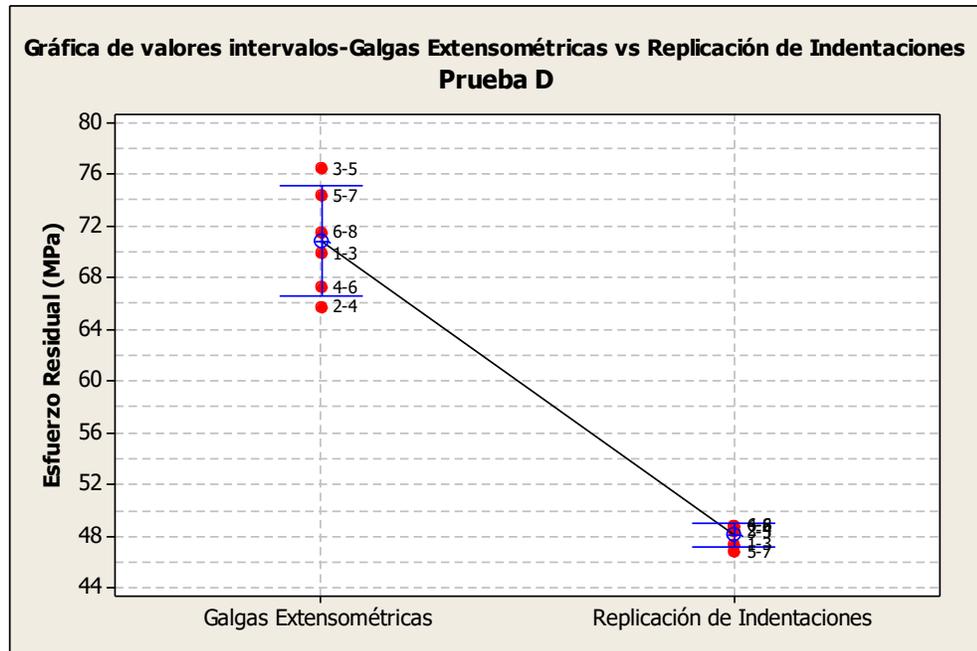


Figura 4.45. Gráfica de intervalos de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba D.

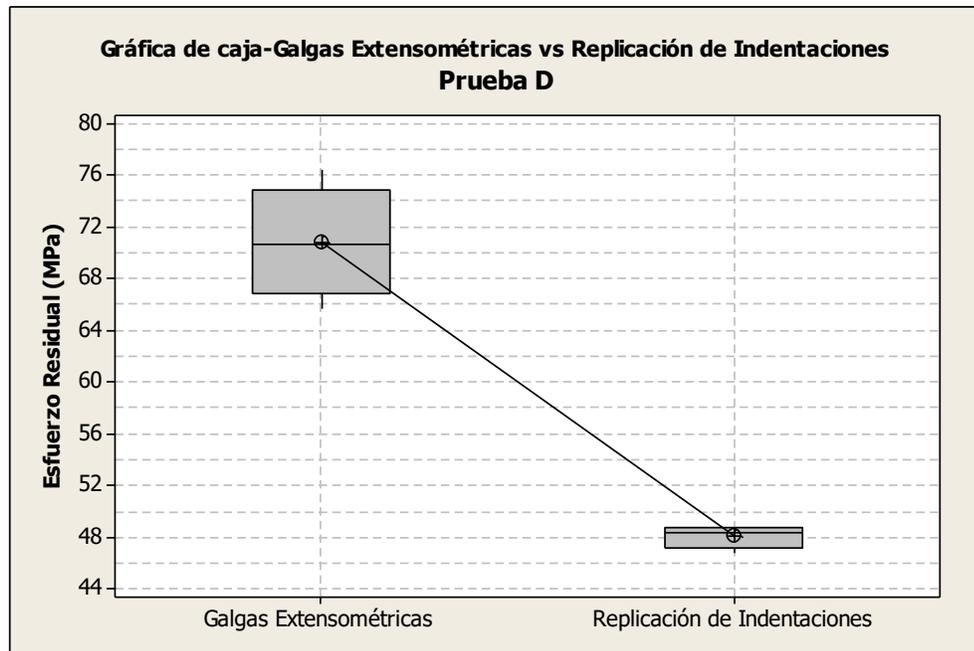


Figura 4.46. Gráfica de caja de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba D.

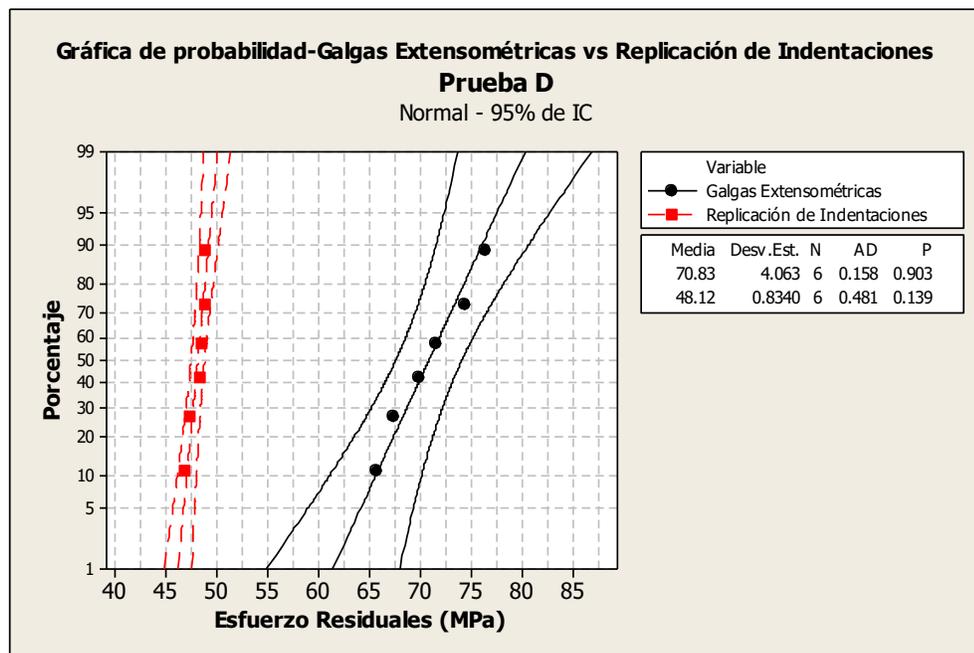


Figura 4.47. Distribución de probabilidad de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba D.

❖ Prueba E

Tabla 4.23. Medición de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y la técnica de replicación de indentaciones a 1.4 pulgadas (35.56 mm) de la Prueba E.

Prueba	Puente entre Cilindros	Galgas Extensométricas (MPa)	Replicación de Indentaciones (MPa)
E	1-3	68.88	47.65
	3-5	66.08	48.85
	5-7	67.97	45.59
	2-4	69.86	50.11
	4-6	68.74	47.81
	6-8	68.53	48.89

Tabla 4.24. Análisis de la varianza (ANOVA) de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba E.

ANOVA Prueba E	
<i>Estadístico F</i>	615.16
<i>Valor-p</i>	0.000
Desviación Estándar (Agrupada)	1.410
R-cuadrada (%)	98.40
R-cuadrada ajustada (%)	98.24

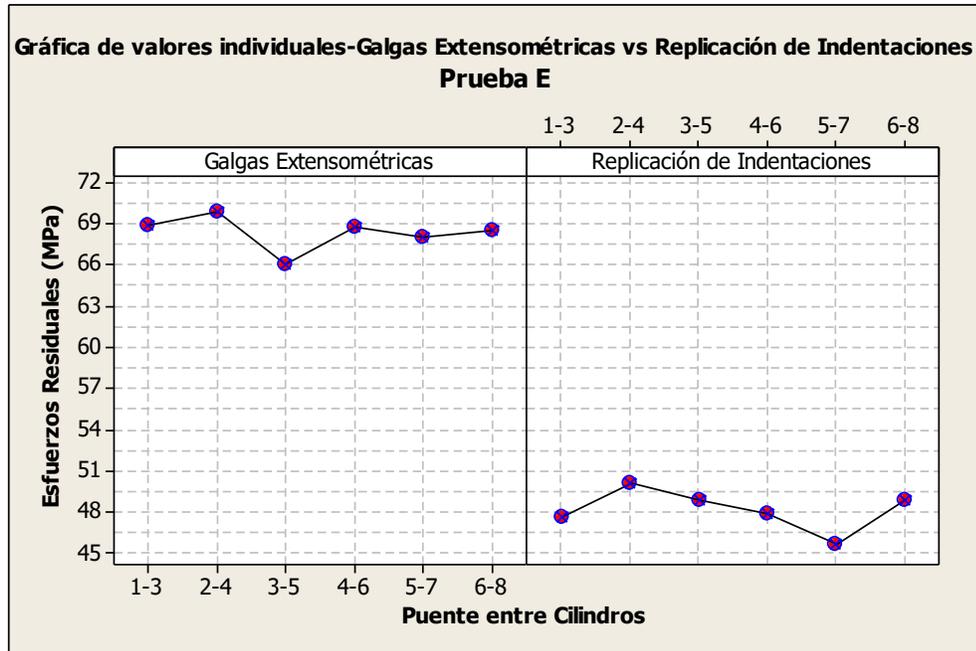


Figura 4.48. Gráfica de valores individuales de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba E.

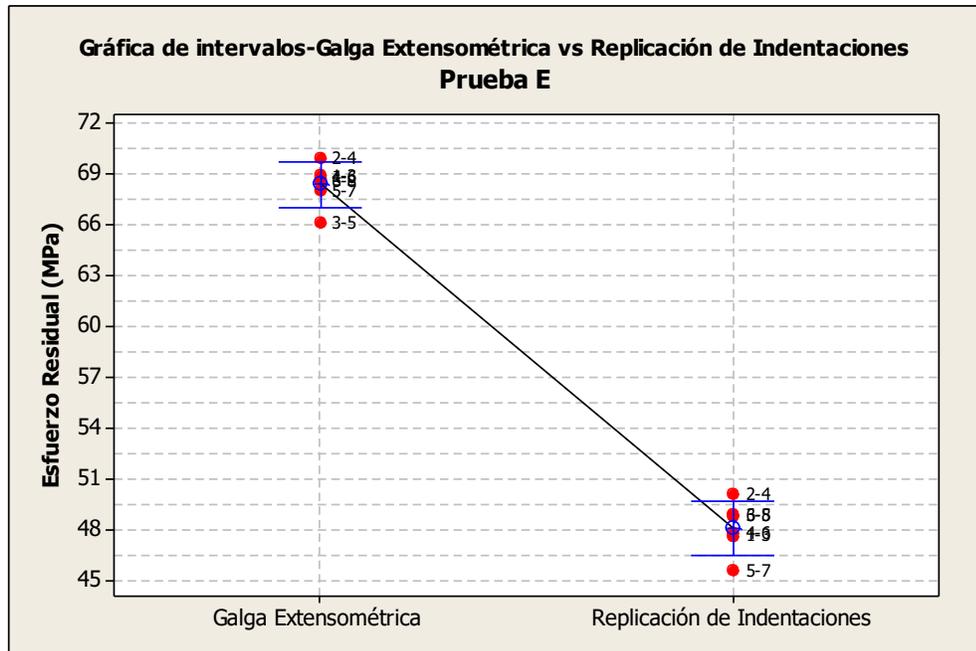


Figura 4.49. Gráfica de intervalos de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba E.

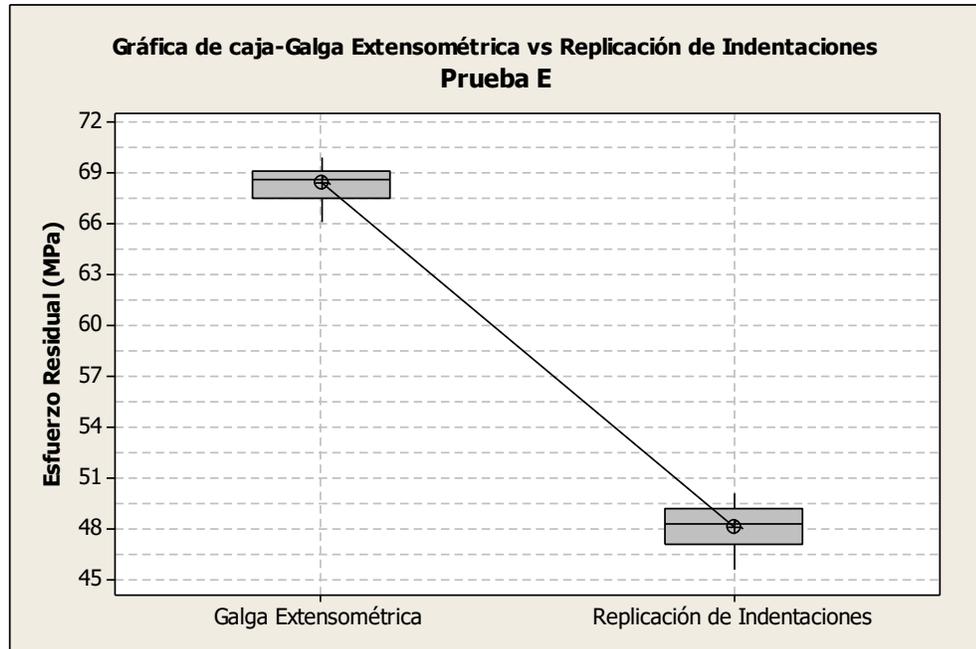


Figura 4.50. Gráfica de caja de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba E.

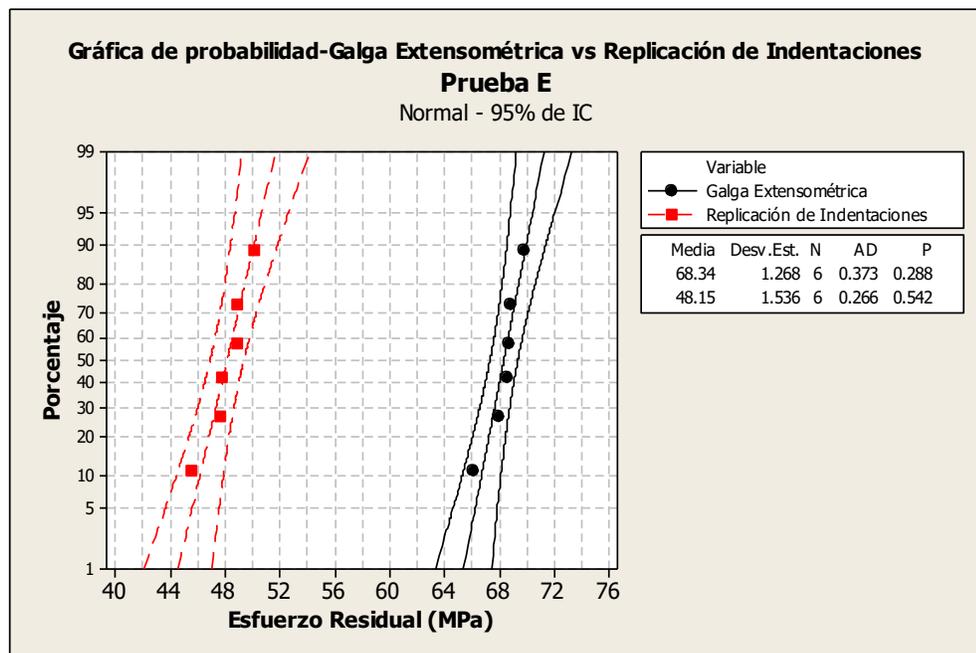


Figura 4.51. Distribución de probabilidad de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba E.

Para tener mayor comprensión de los resultados en las cinco pruebas realizadas, emplearemos estadísticos utilizados para medir la magnitud de la relación (supuestamente lineal) entre ambas técnicas. Mediante una *correlación de Pearson* que es un índice que mide el grado de covariación entre ambas técnicas relacionadas linealmente; obtuvimos un valor de correlación de *0.703* que al ser un valor positivo y cercano a uno, nos sugirió que la relación entre los valores de esfuerzos residuales obtenidos es una *correlación positiva*, es decir cuando exactamente en la medida que aumenta una de ellas aumenta la otra. Esto sucede cuando existe una relación directa y proporcional entre ambas técnicas es funcional.

De manera gráfica en la Figura 4.52., evaluamos esta relación entre ambas técnicas mediante una gráfica de matriz. Al tratarse de una correlación positiva pero no perfecta. Este conjunto de puntos, denominado diagrama de dispersión o nube de puntos tiene interés como primera toma de contacto para conocer la naturaleza de la relación entre los esfuerzos residuales mediante ambas técnicas. La nube al ser alargada apuntando a una recta ascendente, fue susceptible de aplicarse el coeficiente lineal de Pearson. El grosor de la nube da una cierta idea de la magnitud de la correlación; cuanto más estrecha menor será el margen de variación entre ambas técnicas, y por tanto, más acertado los pronósticos, lo que implica una mayor correlación.

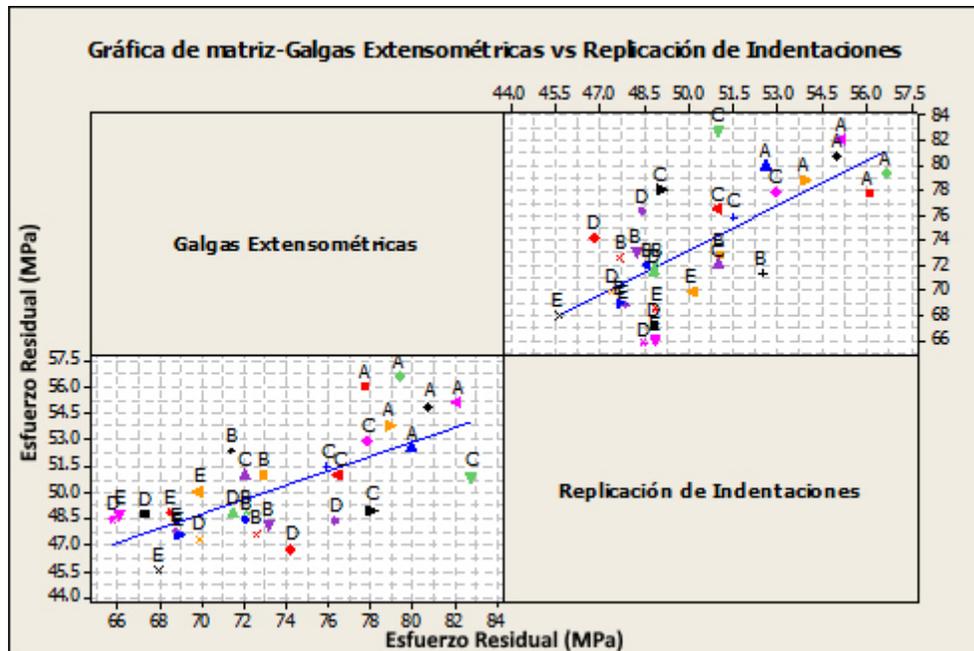


Figura 4.52. Gráfica de matriz de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y la técnica de replicación de indentaciones a 1.4 plg.

4.6. Mapeo de esfuerzos residuales

❖ Prueba F

La realización del mapeo superficial de los esfuerzos residuales a lo largo de los puentes entre cilindros, fue un método más constrictivo para calcular y tener un mejor entendimiento en los mecanismos focales de los esfuerzos; tendiendo a disposición una cantidad de datos suficientes, localizamos variaciones de esfuerzos a lo largo de los puentes entre cilindros asociados a factores de forma vinculados al espesor, gradientes térmicos y campos heterogéneos de deformación (Figura 4.53). Cuantificar estos esfuerzos nos permite evitar aproximarnos a los límites de resistencia del material durante el procesamiento (vaciado, tratamiento térmico, maquinado, etc.) o bien durante la vida de servicio.

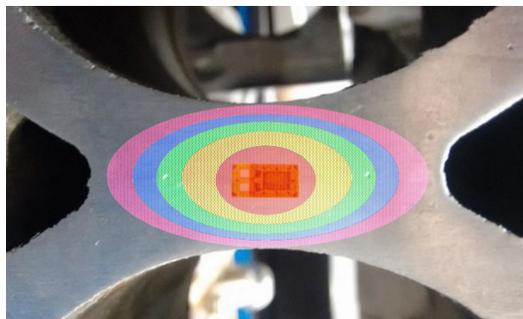


Figura 4.53. Campo de esfuerzos en los puentes entre cilindros.

El uso herramientas de calibración como el punzón de centros en el marcaje de huellas para la medición de la deformación unitaria o el cambio de longitud y el alargamiento en los puentes entre cilindros mediante la Técnica de Replicación de Indentaciones, demostró ser la mejor opción y presentar una menor dispersión como se puede apreciar en el mapeo de esfuerzos residuales en la Zona 4 de la Prueba F (Figura 4.54). En cualquier caso, las marcas deben ser muy ligeras para no dañar el metal, influyendo así en la ruptura.

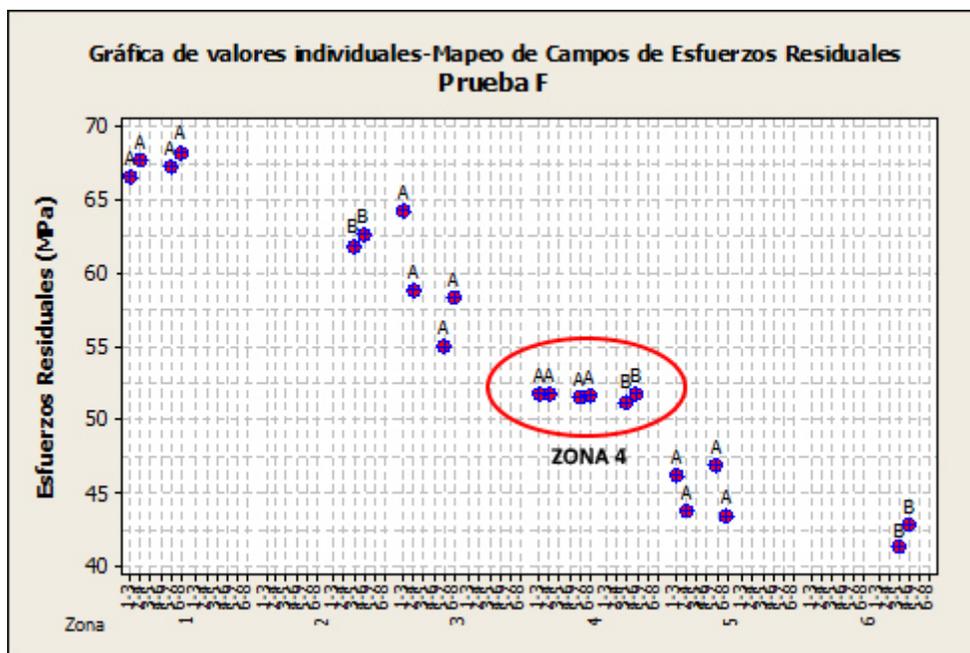


Figura 4.54. Gráfica de valores individuales para el mapeo de campos de esfuerzos residuales mediante la técnica de replicación de indentaciones de la Prueba F.

❖ Técnica de Replicación de Indentaciones

Se tomó la lectura directa de la deformación longitudinal mediante el uso de microscopía óptica antes y después del relevado de esfuerzos a lo largo de los puentes entre cilindros (Apéndice A.5.), relacionando dicha deformación con los esfuerzos residuales mediante la ley de Hooke (ecuación 4.1). Las propiedades de la aleación de aluminio tipo A319 usadas para el cálculo son un módulo de Young (E) de 70,000 MPa y un límite de cedencia de 125 MPa ^[67].

$$\sigma = E (\varepsilon_0 - \varepsilon_1) \quad (4.1)$$

Aunque esta región presenta una gran heterogeneidad de esfuerzos; el mapa de esfuerzos superficiales mediante la Técnica de Replicación de Indentaciones (Figura 4.55.) permitió visualizar que la dirección del máxima esfuerzo a tensión es tangencial a las camisas de hierro y su magnitud aumenta considerablemente al disminuir el espesor debido a la distribución del esfuerzo en un área menor (Tabla 4.25.).

Tabla 4.25. Medición de esfuerzos residuales mediante la técnica de replicación de indentaciones de la Prueba F.

Replicación de Indentaciones				
Prueba	Puente entre Cilindros	Configuración	Zona	Replicación de Indentaciones (MPa)
F	1-3	A	1	66.58
			3	64.22
			4	51.71
			5	46.20
	3-5	B	2	61.90
			4	51.67
			6	41.26
	5-7	A	1	67.27
			3	54.95
			4	51.22
			5	46.93
	2-4	A	1	67.75
			3	58.78
			4	51.51
			5	43.70
	4-6	B	2	62.65
			4	51.71
			6	42.88
	6-8	A	1	68.26
			3	58.38
4			51.59	
5			43.45	

❖ Configuración de indentaciones

Tabla 4.26. Configuraciones de indentaciones de la prueba F.

Prueba	Puente entre Cilindros	Configuración
F	1-3	A
	3-5	B
	5-7	A
	2-4	A
	4-6	B
	6-8	A

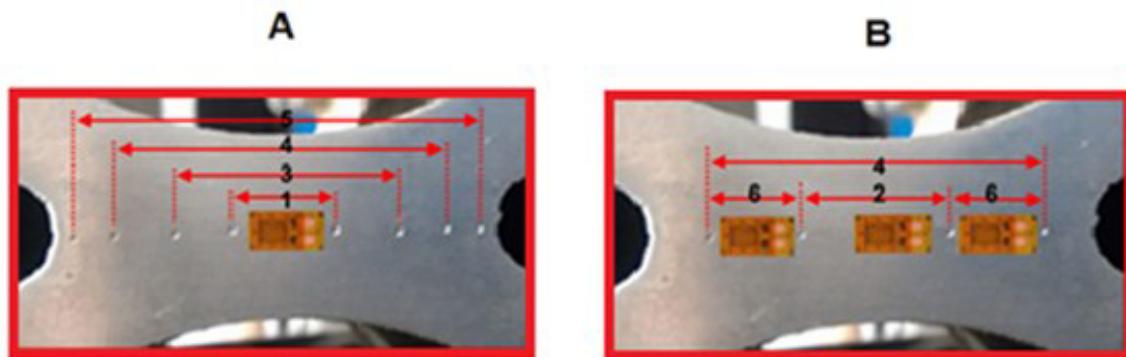


Figura 4.55. Configuraciones A y B de indentaciones de la prueba F.

Las gráficas de valores individuales de la Prueba F, nos ayudó para examinar los valores individuales de esfuerzos residuales en cada puente entre cilindros y evaluar las distribuciones de muestras mediante dos configuración (Figura 2.55.). Además, la gráfica de valores individuales ayudó a detectar errores obvios de ingreso de datos.

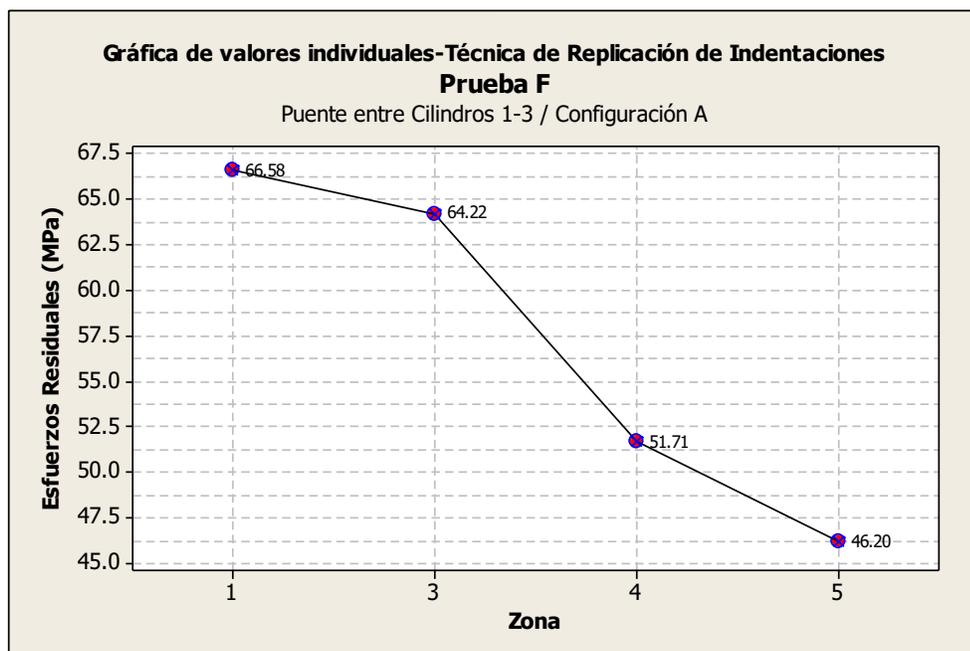


Figura 4.56. Gráfica de valores individuales de esfuerzos residuales mediante la técnica de replicación de indentaciones en el puente entre cilindros 1-3 con la Configuración A de la Prueba F.

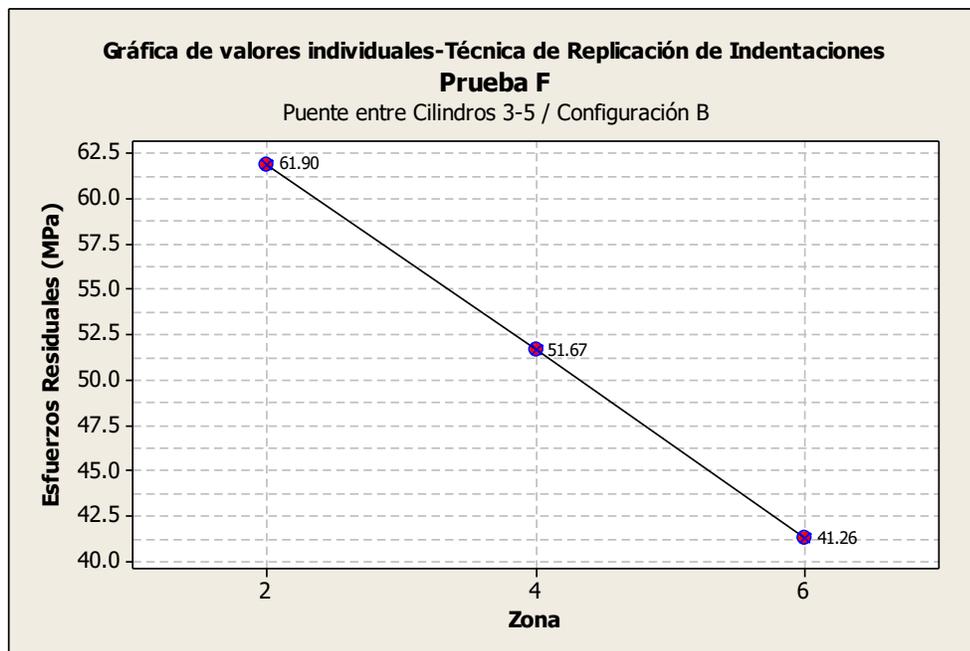


Figura 4.57. Gráfica de valores individuales de esfuerzos residuales mediante la técnica de replicación de indentaciones en el puente entre cilindros 3-5 con la Configuración B de la Prueba F.

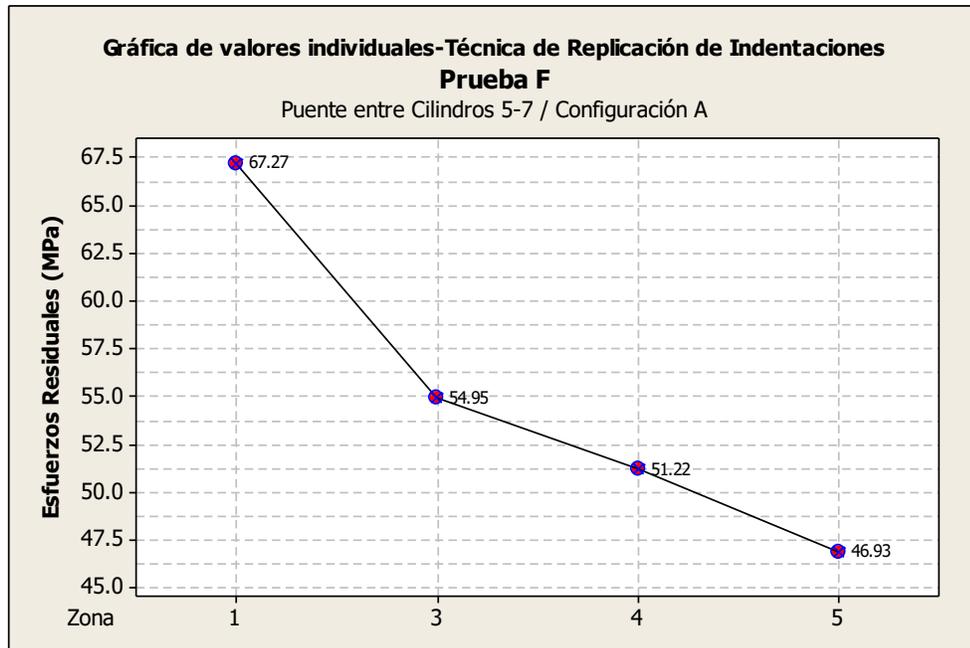


Figura 4.58. Gráfica de valores individuales de esfuerzos residuales mediante la técnica de replicación de indentaciones en el puente entre cilindros 5-7 con la Configuración A de la Prueba F.

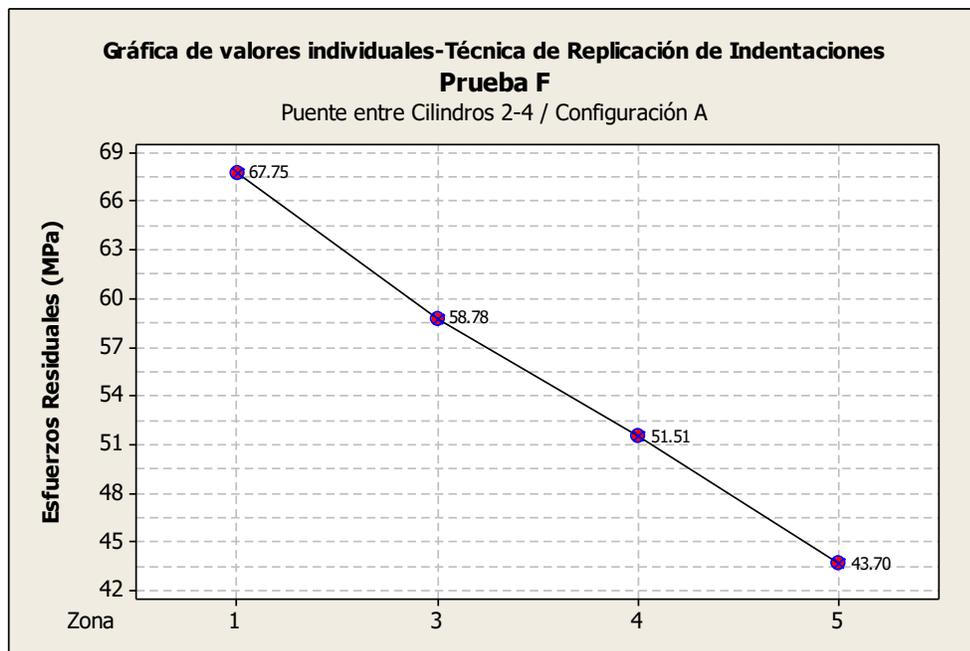


Figura 4.59. Gráfica de valores individuales de esfuerzos residuales mediante la técnica de replicación de indentaciones en el puente entre cilindros 2-4 con la Configuración A de la Prueba F.

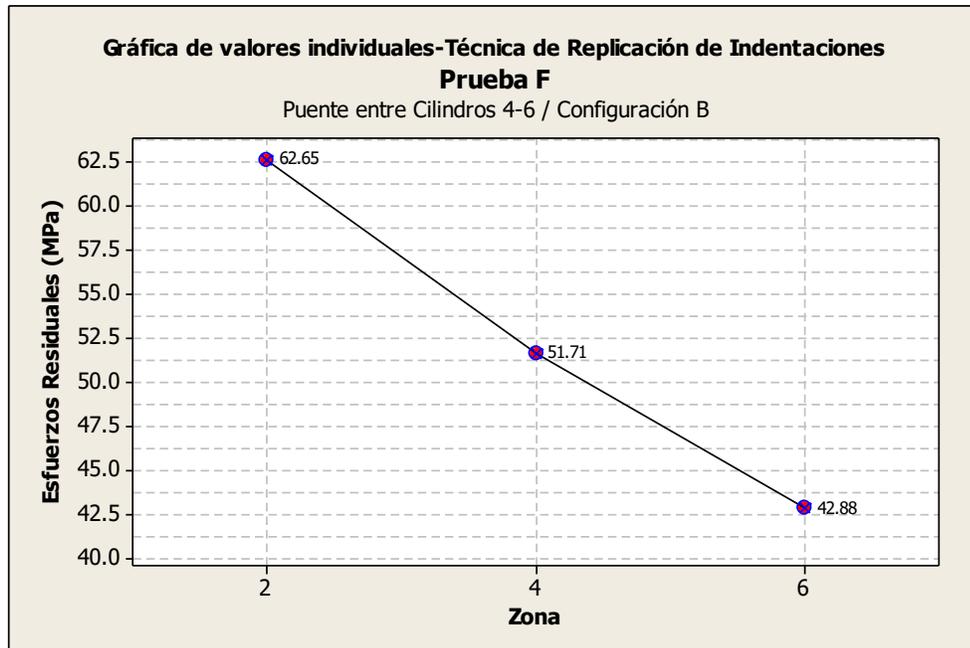


Figura 4.60. Gráfica de valores individuales de esfuerzos residuales mediante la técnica de replicación de indentaciones en el puente entre cilindros 4-6 con la Configuración B de la Prueba F.

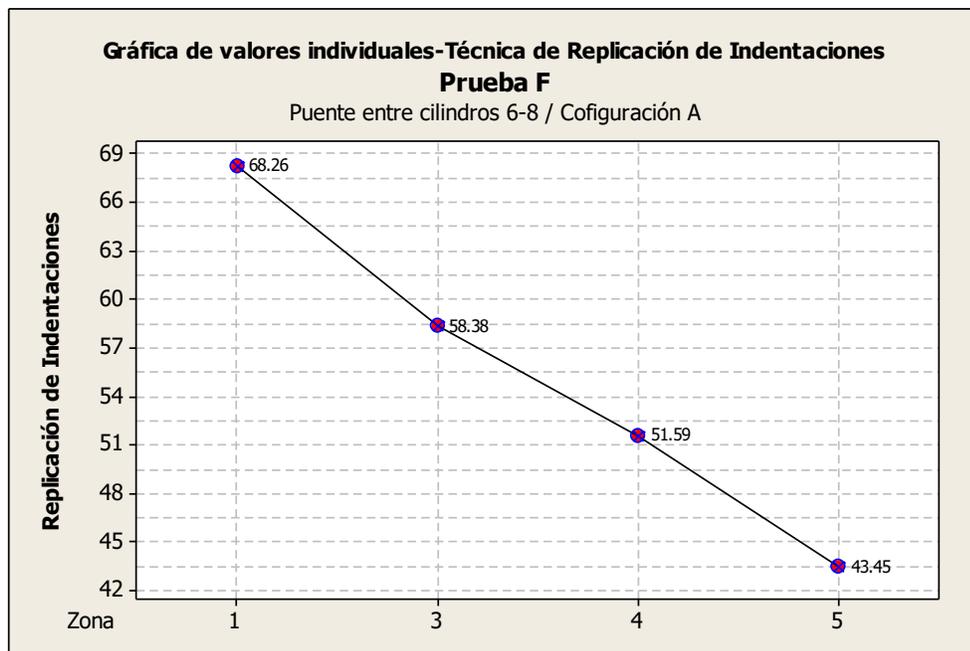


Figura 4.61. Gráfica de valores individuales de esfuerzos residuales mediante la técnica de replicación de indentaciones en el puente entre cilindros 6-8 con la Configuración A de la Prueba F.

Al acercarnos cada vez más al campo de esfuerzos en donde se instaló la Galga Extensométrica, se apreció un aumento de la magnitud de los esfuerzos residuales mediante la Técnica de Replicación de Indentaciones (Tabla 4.21. y 4.22.).

❖ Técnica de Galgas Extensométricas

La Técnica de las Galgas Extensométricas en la medición de esfuerzos residuales consiste en detectar variaciones longitudinales extremadamente pequeñas y convertirlas en variaciones de resistencia eléctrica (Apéndice A.4.). En la ecuación 4.2, está plasmado este principio, donde el factor S es la sensibilidad a la deformación y varía dependiendo el material. Debido a que los cambios de resistencia eléctrica que experimentan las galgas extensométricas son muy pequeños, se emplea para su medición el circuito eléctrico conocido como puente de Wheatstone, el cual convierte estos cambios a señales de voltaje y permite una gran precisión en la medición [78], [79].

$$\frac{dR}{R} = S * \varepsilon \quad (4.2)$$

❖ Configuración de galgas extensométricas

Tabla 4.27. Configuraciones de indentaciones de la prueba F.

Prueba	Puente entre Cilindros	Configuración
F	1-3	A
	3-5	B
	5-7	A
	2-4	A
	4-6	B
	6-8	A

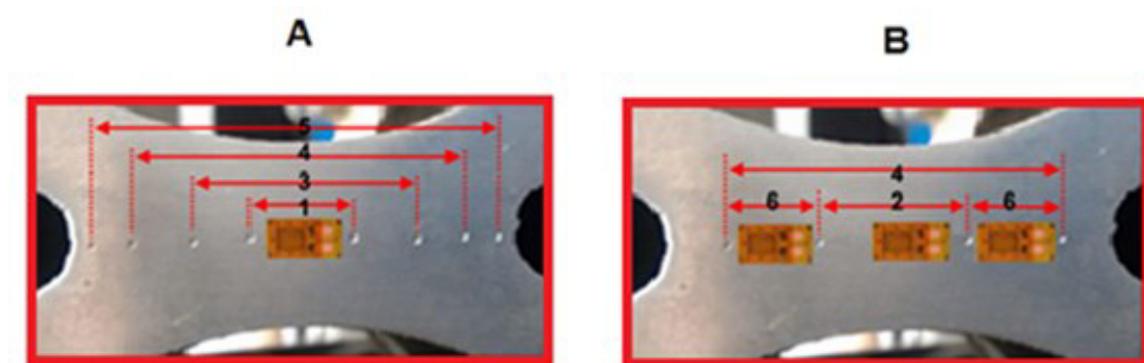


Figura 4.62. Configuraciones A y B de indentaciones de la prueba F.

Al ser evaluados el esfuerzo residual mediante dos configuraciones a lo largo de los puentes entre cilindros mediante la Técnica de Galgas Extensométricas (Figura 4.62.), reveló que al igual que la Técnica de Replicación de indentaciones se presentó una disminución del esfuerzo al alejarnos del centro, esto debido a que la carga se distribuye en una mayor área.

Tabla 4.28. Medición de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas de la Prueba F.

Galgas Extensométricas				
Prueba	Puente entre Cilindros	Configuración	Zona	Esfuerzo Residual (MPa)
F	1-3	A	1	69.45
	3-5	B	2	68.39
	3-5	B	6	41.02
	5-7	A	1	70.01
	2-4	A	1	70.17
	4-6	B	2	69.87
	4-6	B	6	41.75
	6-8	A	1	71.23

Los valores de la distribución de probabilidad de la Tabla 4.29, muestra el ajuste de distribución de los esfuerzos residuales, así como, compara diferentes distribuciones de muestras de la Prueba F. Los puntos de datos aproximadamente siguen una línea recta, el valor p está por encima de 0.05 y el estadístico de Anderson-Darling es bajo. Por lo tanto, la distribución normal parece ajustarse bastante bien.

Tabla 4.29. Valores de la distribución de probabilidad de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y la técnica de replicación de indentaciones.

Técnica	Zona	Configuración	Media de Esfuerzos residuales (MPa)	Desviación Estándar	Anderson Darling	Valor-ρ
Galga Extensométrica	1	A	70.22	0.7438	0.267	0.461
	2	B	69.13	1.050	0.250	0.227
	6	B	41.38	0.5148	0.250	0.227
Replicación de Indentaciones	1	A	67.47	0.7152	0.162	0.848
	2	B	62.28	0.5301	0.250	0.227
	6	B	42.07	1.145	0.250	0.227

❖ Zona 1 / Configuración A

Los resultados obtenidos mediante la configuración A en la Zona 1 muestran una media del esfuerzo de 70.22 MPa en el caso de la Técnica de Galgas Extensométricas y de 67.47 MPa mediante la Técnica de Replicación de Indentaciones. Si bien es cierto que existe una diferencia significativa estadísticamente entre ambas técnicas, también lo es el hecho que al acercarnos al campo de esfuerzos donde fue instalada la galga extensométrica percibimos una magnitud con una tendencia a aumentar.

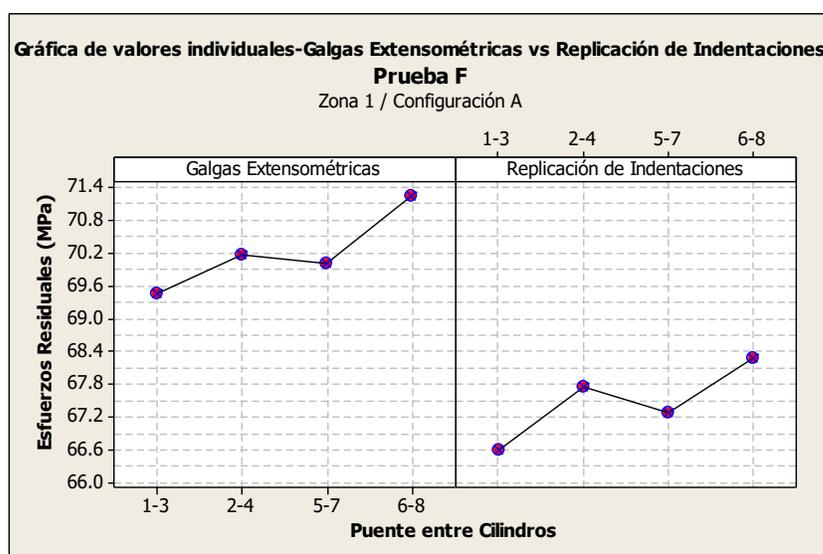


Figura 4.63. Gráfica de valores individuales de esfuerzos residuales en la Zona 1 con la Configuración A de la Prueba F.

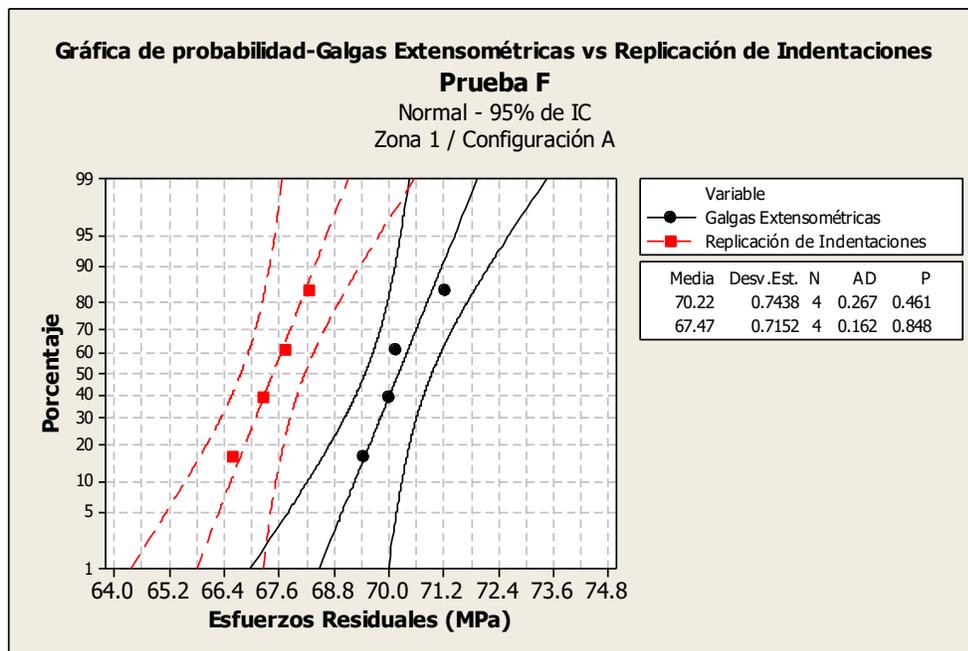


Figura 4.64. Gráfica de probabilidad de esfuerzos residuales en la Zona 1 con la Configuración A de la Prueba F.

❖ Zona 2 / Configuración B

Los resultados obtenidos mediante la configuración B en la Zona 2 muestran una media del esfuerzo de 69.13 MPa en el caso de la Técnica de Galgas Extensométricas y de 62.28 MPa mediante la Técnica de Replicación de Indentaciones. La diferencia entre las magnitudes es aún más visible debido a que las huellas se entran más alejadas del campo de esfuerzos donde fue instalada la galga extensométrica.

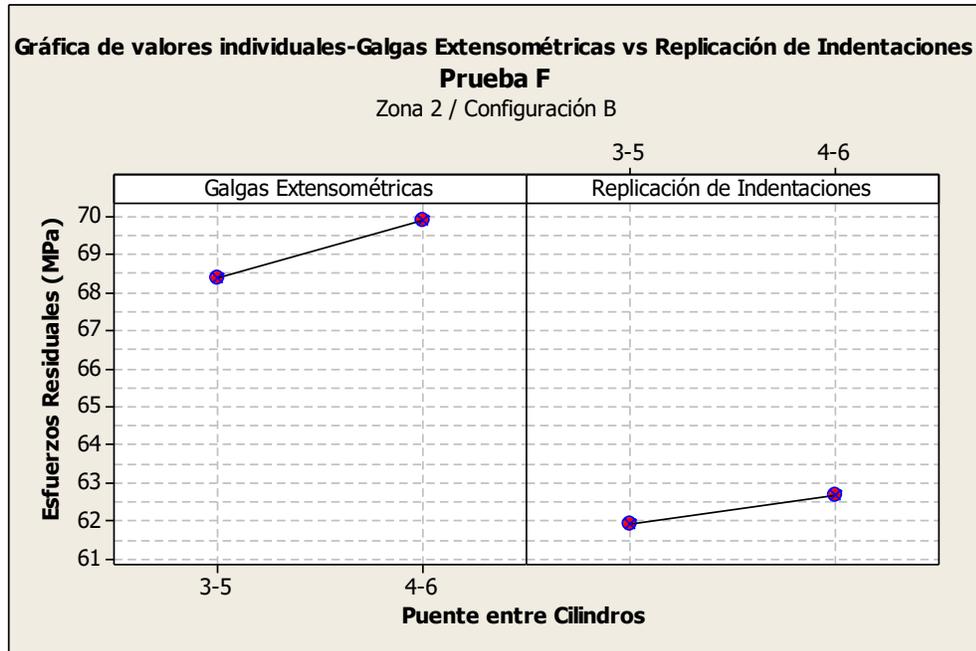


Figura 4.65. Gráfica de valores individuales de esfuerzos residuales en la Zona 2 con la Configuración B de la Prueba F.

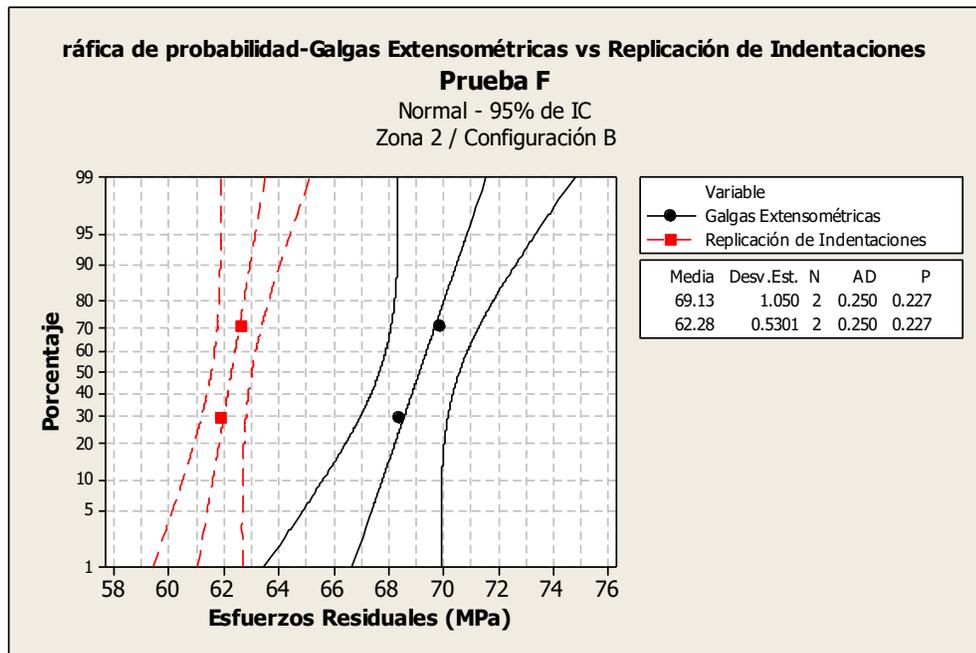


Figura 4.66. Gráfica de probabilidad de esfuerzos residuales en la Zona 2 con la Configuración B de la Prueba F.

❖ Zona 6 / Configuración B

Los resultados obtenidos mediante la configuración B en la Zona 6 muestran una media del esfuerzo de 41.38 MPa en el caso de la Técnica de Galgas Extensométricas y de 42.07 MPa mediante la Técnica de Replicación de Indentaciones. Los valores de la distribución de probabilidad de la Tabla 4.22., muestra el ajuste de distribución de los esfuerzos residuales, así como, compara las diferentes distribuciones de muestras de la Prueba F. Los puntos de datos aproximadamente siguen una línea recta, el valor p está por encima de 0.05 y el estadístico de Anderson-Darling es bajo. Por lo tanto, la distribución normal parece ajustarse bastante bien a los datos de la muestra.

Tabla 4.30 Valores de la distribución de probabilidad de esfuerzos residuales en la Zona 6 con la Configuración B de la Prueba F.

Técnica	Media de Esfuerzos residuales (MPa)	Desviación Estándar	Anderson Darling	Valor- ρ
Galga Extensométrica	41.38	0.5148	0.250	0.227
Replicación de Indentaciones	42.07	1.145	0.250	0.227

Realizando un análisis de la varianza (ANOVA) de esfuerzos residuales, se confirmó la hipótesis nula (h_0). En este caso, la hipótesis nula estableció que la variabilidad de las medias entre las mediciones de los esfuerzos residuales mediante la Técnica de Indentaciones y las Galgas Extensométricas evaluando en el mismo campo de esfuerzos fue estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95.0% ($\alpha=0.05$) mediante la configuración B en la zona 6 de la Prueba F (Tabla 4.23.).

Tabla 4.31. Análisis de la varianza (ANOVA) de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones en la Zona 6 con la Configuración B de la Prueba F.

ANOVA Prueba F	
<i>Estadístico F</i>	0.59
<i>Valor-ρ</i>	0.552
Desviación Estándar (Agrupada)	0.8879
R-cuadrada (%)	22.86

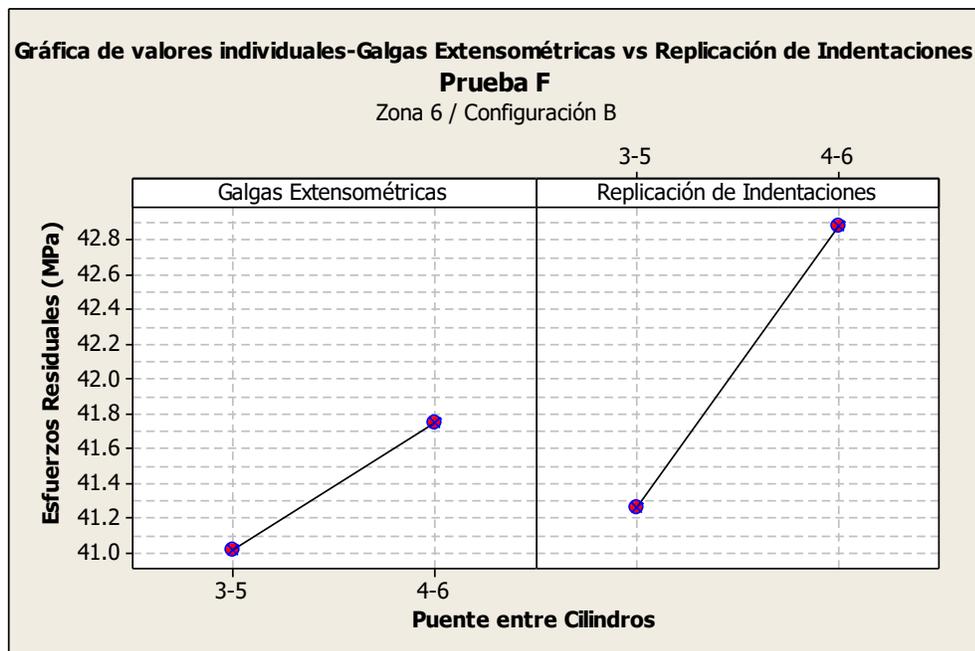


Figura 4.67. Gráfica de valores individuales de esfuerzos residuales en la Zona 6 con la Configuración B de la Prueba F.

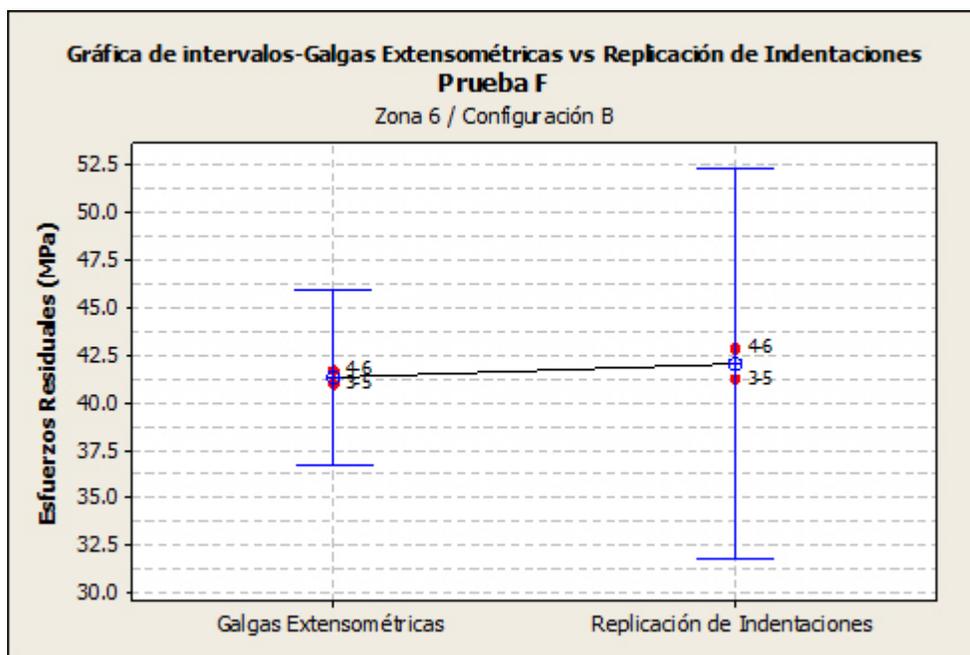


Figura 4.68. Gráfica de valores individuales de esfuerzos residuales en la Zona 2 con la Configuración B de la Prueba F.

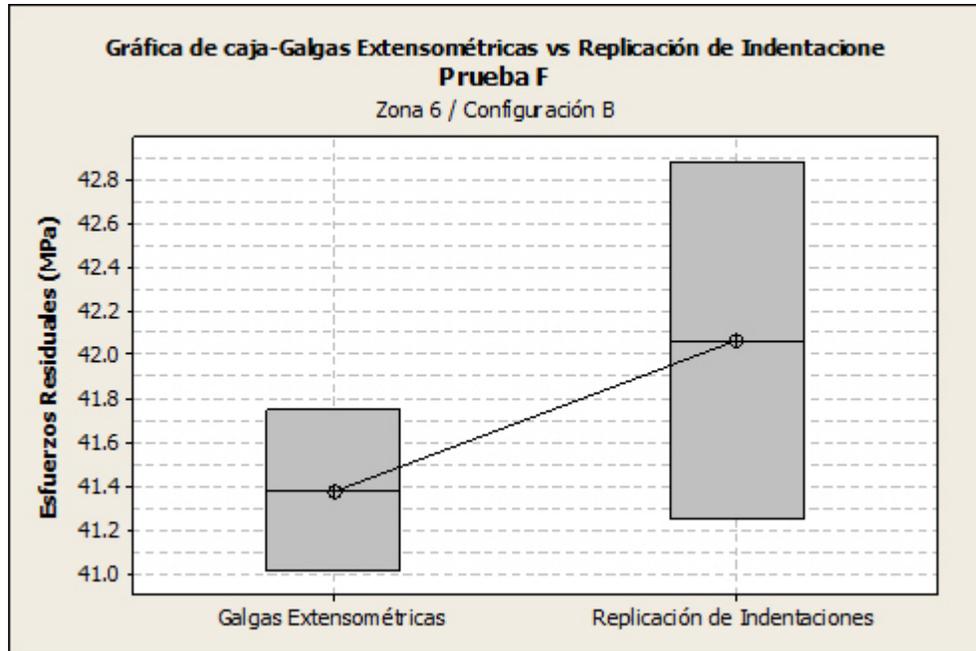


Figura 4.69. Gráfica de caja de esfuerzos residuales en la Zona 2 con la Configuración B de la Prueba F.

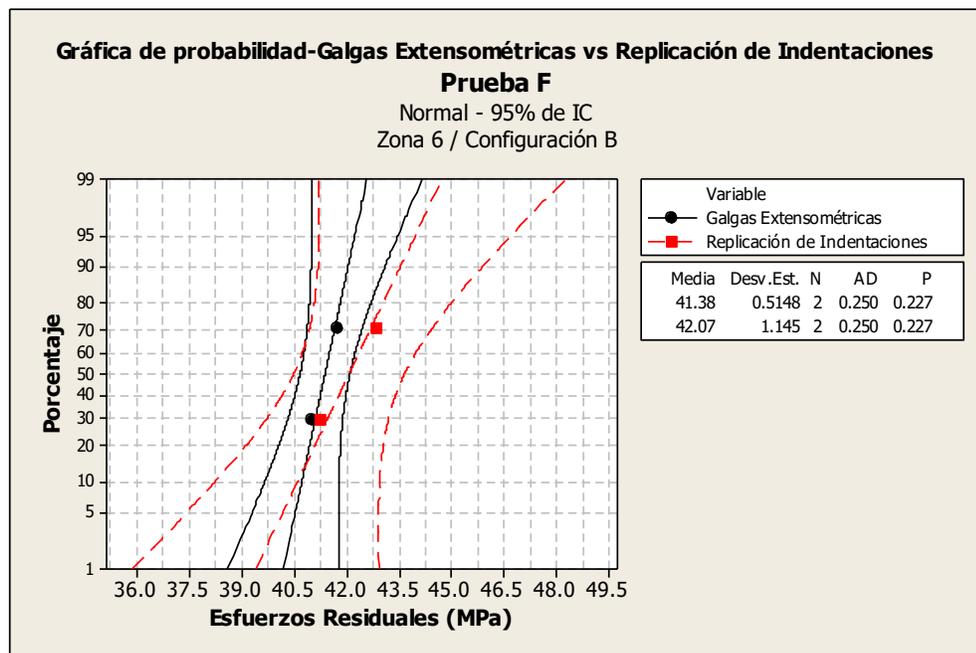


Figura 4.70. Gráfica de probabilidad de esfuerzos residuales en la Zona 6 con la Configuración B de la Prueba F.

❖ Prueba G

Los resultados obtenidos de la Prueba G (Tabla 4.32.) muestran una media del esfuerzo de 76.47 MPa en el caso de la Técnica de Galgas Extensométricas (Apéndice A.6.) y de 76.16 MPa mediante la Técnica de Replicación de Indentaciones a 10 mm entre huellas (Apéndice A.7.) evaluados en el mismo campo de esfuerzos al centro de los puentes entre cilindros como se muestra la Figura 3.69. La dirección del máxima esfuerzo a tensión es tangencial a las camisas de hierro y el valor más alto de esfuerzos residuales en los puentes entre cilindros se presentó al centro de los puentes entre cilindros.

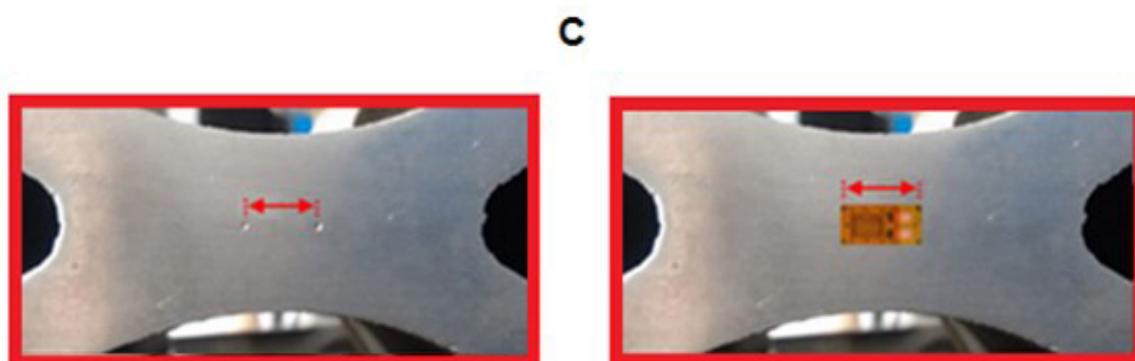


Figura 3.71. Configuraciones C de indentaciones de la prueba G.

Tabla 4.32. Medición de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones de la Prueba G.

Prueba	Puente entre Cilindros	Galgas Extensométricas (MPa)	Replicación de Indentaciones (MPa)
G	1-3	76.16	76.53
	3-5	75.81	76.31
	5-7	76.86	76.72
	2-4	76.58	76.85
	4-6	76.02	76.31
	6-8	75.88	76.11

Realizando un análisis de la varianza (ANOVA), se confirmó la hipótesis nula (h_0). En este caso, la hipótesis nula estableció que la variabilidad de las medias entre las

mediciones de los esfuerzos residuales mediante la Técnica de Replicación de Indentaciones y las Galgas Extensométricas evaluando en el mismo campo de esfuerzos al centro de los puentes entre cilindros fue estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95.0% ($\alpha=0.05$) (Tabla 4.33.).

Tabla 4.33. Análisis de la varianza (ANOVA) de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones de la Prueba G.

ANOVA Prueba F	
<i>Estadístico F</i>	3.54
<i>Valor-p</i>	0.089
Desviación Estándar (Agrupada)	0.2960
R-cuadrada (%)	26.14

Las gráficas de valores individuales de la Prueba G, nos ayudó para examinar los valores individuales de los esfuerzos residuales en cada puente entre cilindros y evaluar su distribuciones (Figura 4.70.).

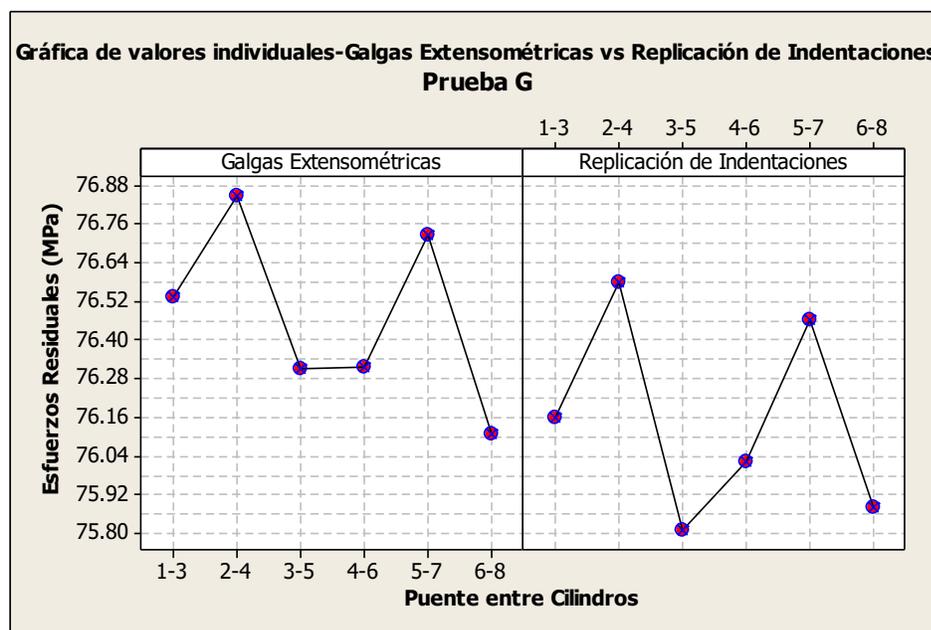


Figura 4.72. Gráfica de valores individuales de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones de la Prueba G.

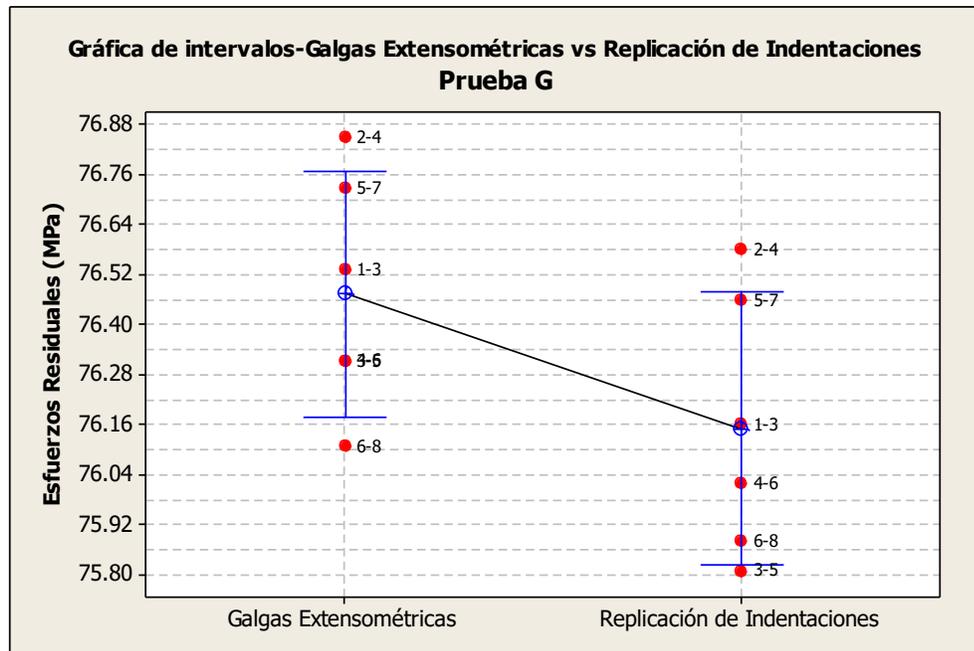


Figura 4.73. Gráfica de intervalos de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones de la Prueba G.

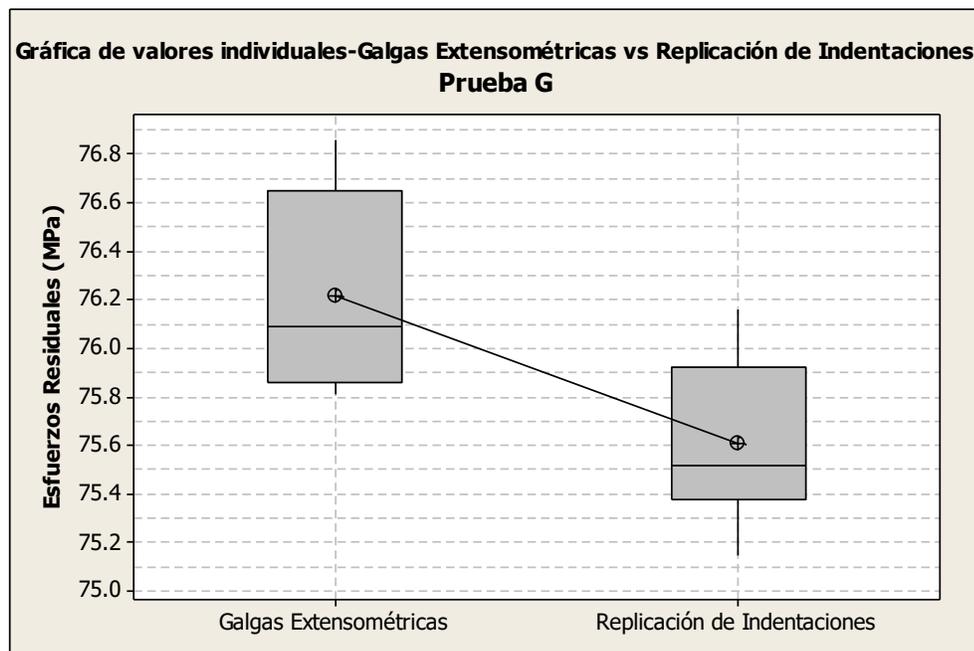


Figura 4.74. Gráfica de caja de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones de la Prueba G.

Las gráficas de probabilidad (Figura 4.73.), muestra el ajuste de distribución de los esfuerzos residuales de la Prueba G. Los puntos de datos aproximadamente siguen una línea recta, el valor p está por encima de 0.05 y el estadístico de Anderson-Darling es bajo. Por lo tanto, la distribución normal parece ajustarse bastante bien a los datos de la muestra en ambas técnicas (Tabla 4.34).

Tabla 4.34. Valores de la distribución de probabilidad de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y la técnica de replicación de indentaciones de la Prueba G.

Técnica	Media de Esfuerzos Residuales (MPa)	Desviación Estándar	Anderson Darling	Valor- p
Galga Extensométrica	76.473	0.279	0.229	0.672
Replicación de Indentaciones	76.162	0.312	0.262	0.554

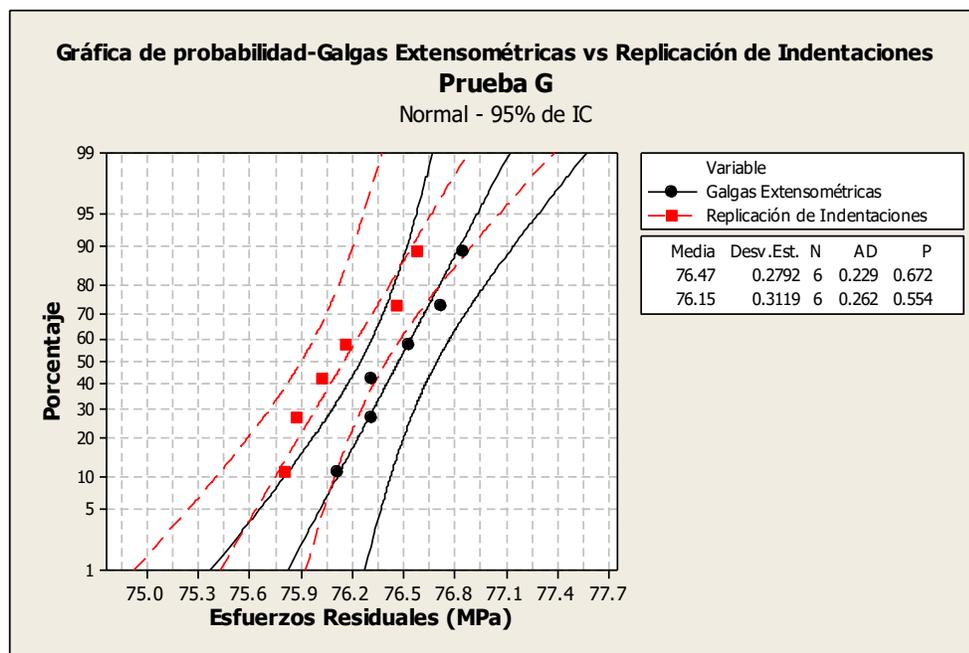


Figura 4.75. Gráfica de probabilidad de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones de la Prueba G.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

1. La región evaluada en los puentes entre cilindro muestra altos valores de espaciamento dendrítico secundario (EDS) y de porosidad, debido a una baja velocidad de enfriamiento durante la solidificación. Dicha velocidad causó un refinamiento moderado y una modificación entre 2 y 3 (American Foundrymen's Society) en presencia del estroncio.
2. El Sistema de Replicación de Indentaciones transfirió la superficie de los puentes entre cilindros a réplicas positivas, precisas y estables, con una resolución cercana a $+2 \mu\text{m}$ respecto a las mediciones directas del espaciamento entre pares de huellas. Las réplicas ofrecen resultados precisos y adecuados para numerosas aplicaciones su versatilidad, almacenamiento y transportación de las réplicas.
3. El uso de herramientas de calibración como el punzón de centros, demostró ser la mejor manera para el marcaje de indentaciones en la medición de deformación unitaria o el cambio de longitud y el alargamiento en los puentes entre cilindros.
4. La Técnica de Replicación de Indentaciones al igual que la Técnica de Galgas Extensométricas para la medición de la deformación en los puentes entre cilindro, revelaron que la dirección del máximo esfuerzo es tangencial a las camisas de hierro gris y estaban sometidos a tensión.

5. El mapeo de esfuerzos residuales demostró la presencia de campos de esfuerzos a lo largo de los puentes entre cilindros asociados a factores de forma vinculados al cambio del espesor, aumentando considerablemente su magnitud al disminuir el espesor.

6. Realizando análisis estadísticos de los esfuerzos residuales evaluados mediante la Técnica de Replicación de Indentaciones al centro de los puentes entre cilindros, se demostró que fueron estadísticamente significativos con un nivel de confianza del 95.0% ($\alpha=0.05$) respecto los obtenidos mediante la Técnica de Galgas Extensométricas.

4.2. Recomendaciones

1. Desarrollo tecnologías e instrumentación para la implementación y optimización de la Técnica de Replicación de Indentaciones y su sensibilidad en la medición de esfuerzos residuales en productos automotriz con geométricas más complejas.
2. Medición de esfuerzos residuales en monobloques V8 de aluminio con diversos espesores de los puentes entre cilindros, evaluando factores de forma y campos heterogéneos de deformación.
3. Análisis de la sobrevivencia de las huellas por el efecto de diversos esquemas de tratamiento térmico sobre los monoblocks V8 de aluminio para la medición de esfuerzos residuales mediante la Técnica de Replicación de Indentaciones.
4. Variación de la velocidad de enfriamiento después del tratamiento térmico en solución (20, 45, 75, 100 ° C / min) para observar la influencia de la velocidad de enfriamiento en la microestructura y la sensibilidad de la Técnica de Replicación de Indentaciones en la medición de esfuerzo residual en monobloques V8 de aluminio.
5. Análisis microestructural y medición de esfuerzos residuales en monobloques V8 de aluminio mediante la Técnica de Replicación de Indentaciones probado en servicio y en condiciones extremas.

REFERENCIAS

- [1]. Alexey Sverdlin, "Introduction to Aluminum". George E. Totten y D. Scott MacKenzie, "Handbook of Aluminum, Vol.1, Physical Metallurgy and Processes", Marcel Dekker, Inc., pp. 1, 2003.
- [2]. I. J. Polmear, "Light Alloys, Metallurgy of the Light Metals", Edward Arnold, pp. 7–9, 15–27, 47, 58–62, 89, 110–125, 1981.
- [3]. Altenpohl D. G. "Aluminum: Technology, applications, and environment" A Profile of a Modern Metal (Sixth Edition). The aluminium association, Inc. pp 1-2, 7.
- [4]. Alexey Sverdlin, "Properties of Pure Aluminum". George E. Totten y D. Scott MacKenzie, "Handbook of Aluminum, Vol.1, Physical Metallurgy and Processes", Marcel Dekker, Inc., pp. 33–59, 66–72, 2003.
- [5]. E. A. Brandes y G. B. Brook, "Smithells Light Metals Handbook", Butterworth-Heinemann, pp 5-9, 1998.
- [6]. Murat Tiryakioğlu y James T. Staley, "Physical Metallurgy and the Effect of Alloying Additions in Aluminum Alloys". George E. Totten y D. Scott MacKenzie, "Handbook of Aluminum, Vol.1, Physical Metallurgy and Processes", Marcel Dekker, Inc., pp. 1, 91, 2003.
- [7]. I. Polmear, I.J. Light Metals, E. Arnold Publishers, London (1981).
- [8]. John R. Brown. Foseco Non-Ferrous Foundryman's Handbook. 11ed. Butterworth Heinemann. 1999 (PP.296).
- [9]. American National Standard Alloy and temper Designation Systems for Aluminium, PP/2650/988/11, Aluminium Association, Julio 1988.
- [10]. Robert Howard, Neils Bogh y D. Scott MacKenzie, "Heat Treating Processes and Equipment", "Handbook of Aluminum, Vol.1, Physical Metallurgy and Processes", Marcel Dekker, Inc., pp. 881–916, 920, 2003.
- [11]. Rafael Colás, Eulogio Velasco y Salvador Valtierra, "Castings". George E. Totten y D. Scott MacKenzie, "Handbook of Aluminum, Vol.1, Physical Metallurgy and Processes", Marcel Dekker, Inc., pp. 591–593, 602, 2003.
- [12]. L. Mondolfo "Aluminium Alloys: Structure and Properties", Butterworth, Londres (1986).
- [13]. Davis, J.R., "ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys", ASM International, Materials Park, OH, USA (1993).
- [14]. Tavitias-Medrano, F.J., Gruzleski, J.E., Samuel, F.H., Valtierra, S. and Doty, H.W., "Effect of Mg and Sr-Modification on the Mechanical Properties of 319-type Aluminum Cast Alloys Subjected to Artificial Aging", Materials Science and Engineering A., vol.480, pp. 356-364 (2008).
- [15]. Aluminum Casting Technology" AFS, Inc. 2001.

- [16]. A.K. Dahle. Eutectic modification and microstructure development in Al-Si alloys (2005).
- [17]. John E. Gruzleski y Bernard M. Closset, "The Treatment of Liquid Aluminum-Silicon Alloys", The American Foundrymen's Society, Inc., pp. 1-59, 75-77, 127-140, 149, 1990.
- [18]. R. Trivedi y W. Kurz, "Solidification of Single-Phase Alloys", "ASM Handbook Vol. 15: Casting", ASM Internacional, pp. 244-256, 1992.
- [19]. M. C. Flemmings, T.Z. Kattamis, B. P. AFS Transactions 91-176, pag. 501.
- [20]. B. H. Alexander, F. N. Rhines. JOM, vol. 88, pag. 126 (1950).
- [21]. J, A, Horwath, L. F. Mondolfo. Acta Metalúrgica vol. 10, pag. 1037 (1962).
- [22]. J.G. Kaufman, E.L. Rooy "Aluminum Alloy Castings", Properties, Processes and Applications", American Foundry Society / ASM International (2005), Materials Park OH., pp.44.
- [23]. 2. A. Kearney, L. Rooy, Aluminum Foundry Products, Alloy Systems; ASM Handbook Volumen 2, ASM International 2000.
- [24]. Serope Kalpakjian. Manufacturing Processes for Engineering Materials. Addison Wesley 1991.
- [25]. Donald R. Askeland. The Science and Engineering of Materials, PWS 1994.
- [26]. C. Debandi*, C. Priotti t , G. Lebón# y J. Gargano., Estructuras Modificadas en Aleaciones Hipereutécticas Al-Si, Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, Vol. 4, N° 1, 1984.
- [27]. Samuel, F.H., Ouellete, P., Samuel, A.M. and Doty, H.W., "Effect of Mg and Sr. Additions on the Formation of Intermetallics in Al-6 wt pct Si- 3.5 wt pct Cu- (0.45) to (0.8) wt pct Fe 319-type Alloys", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 29, pp. 2871-2884 (1998).
- [28]. S. Valtierra. M. Tash. F.H. Samuel Effect of metallurgical parameters on the machinability of heat-treated 356 and 319 aluminum alloys. Elsevier (2006).
- [29]. George E. Dieter, "Introduction to Workability", "ASM Handbook Vol. 14: Forming and Forging", ASM Internacional, pp. 786 - 787, 1988.
- [30]. ASM Handbook Properties and selection nonferrous alloys And Special-Purpose Materials. Vol 2, 1990. George E. Dieter, "Introduction to Workability", "ASM Handbook Vol. 14: Forming and Forging", ASM International, pp. 786 - 787, 1988.
- [31]. Dieter, G. E. "Mechanical metallurgy" Editorial, Mc Graw Hill. Edición del sistema métrico decimal, 1988. Pág. 5-8.
- [32]. Rossini N.S., Dassisti M., Benyounis K.Y., Olabi A.G., Methods of measuring residual stresses in components, Mat. and Design, Vol.35, p.572-88, 2012.
- [33]. Avner S.H., Introducción a la metalurgia física, Ed. Del Castillo S.A., 1966.

- [34]. Webster G.A., Ezelio A.N., Residual stress distributions and their influence on fatigue lifetimes, *Int. J. Fatigue*, Vol.23, p.375-83, 2001.
- [35]. Wyatt J.E., Berry J.T., A new technique for the determination of superficial residual stresses associated with machining and other manufacturing processes, *Vol.171*, p.132-40, 2006.
- [36]. Mocarski S., Carburizing and its Control I. Basic Considerations, *Ind. Heat*. 41(5), 1974, 58-70.
- [37]. Baldwin W.M., Residual stresses in metals, Philadelphia: Proc. American Society for Testing and Materials, p.49, 1949.
- [38]. Treuting R.G., Read W.T., A mechanical determination of biaxial residual stress in sheet materials, *J, Appl. Phys.*, Vol. 22(2), p.130-34, 1951.
- [39]. Prime M.B., Residual stress measurement by successive extension of a slot: the crack compliance method, *Appl. Mech. Rev.*, Vol.52 (2), p.75-96, 1999.
- [40]. Smith D.J., Farrahi G.H., Zhu W.X., McMahon C.A., Obtaining multiaxial residual stress distributions from limited measurements, *Mat. Sci. and Eng. A*, Vol.303, p.281-91, 2001.
- [41]. ASME E837-08 Standard Test Method for determining Residual stresses by the hole-drilling Strain-gauge Method.
- [42]. Olabi A.G., Hashmi M.S.J., Stress relief procedure for low carbon steel 1020 welded components, *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol.56, p.552-62, 1996.
- [43]. Kandil F.A., Lord J.D., A review of residual stress measurement methods, a guide to technique selection, NPL Report MAT(A)04, 2001.
- [44]. Choltes B., Residual stress analysis of components with real geometries using the incremental hole-drilling technique and a differential evaluation method, Kassel University press GmbH, 2007.
- [45]. Vishay measurements group, 2007 <<http://www.vishaypg.com/>> (accessed March 1, 2011).
- [46]. Mocarski S., Carburizing and its Control I. Basic Considerations, *Ind. Heat*. 41(5), 1974, 58-70.
- [47]. Olabi A.G., Hashmi M.S.J., The effect of the stress-relief conditions on a martensite stainless-steel welded component, *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol.77, p.216-25, 1998.
- [48]. Schajer G.S., Hole-Drilling Residual Stress Measurement at 75: Origins, Advances, Oportunities. *Exp. Mech.*; Vol.50, p.245-53, 2009.
- [49]. Flaman M.T., Herring G.A., Comparison of four hole-producing techniques for the center-hole residual-stress measurement method, *Exp. Tech.*, Vol. 9, p.30-2, 1985.
- [50]. Flaman M.T., Herring G.A., Ultra-high-speed center-hole technique for difficult machining materials, *Exp. Tech.*, Vol. 10, p.34-5, 1986.
- [51]. Lee H.T., Hsu F.C., Feasibility evaluation of EDM hole drilling method for residual stress measurement, *Mater Sci Technol*, Vol. 19, p.1261-65, 2003.
- [52]. Lee H.T., Rehbach W.P., Hsu F.C., Ta T.Y., Hsu E., The study of EDM hole-drilling method for measuring residual stress in SKD 11 tool steel, *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol.19, p.88-93, 2004.

- [53]. Lee H.T., Liu C., Calibration of residual stress measurements obtained from EDM hole drilling method using physical material properties, *Mat. Sci. Tech.*, Vol.24, p.1462-69, 2008.
- [54]. Sicot O., Gong X.L., Cherouat A., Lu J., Determination of residual stress in composite laminates using the incremental hole-drilling method, *J. Compos. Mat.*, Vol.37, p.831-44, 2003.
- [55]. Olabi A.G., Benyounis K.Y., Hashmi M.S.J., Application of Response Surface Methodology in Describing the Residual Stress Distribution in CO₂ Laser Welding of AISI304, *Strain*, Vol. 43(1), p.37-46, 2007.
- [56]. Norton J.H., Rosenthal D., Stress measurement y x-ray diffraction, *Proc. Soc. Exp. Stress Anal.*, Vol.1(2), p.73-6, 1944.
- [57]. Norton J.H., Rosenthal D., Application of the x-ray method of stress measurement to problem involving residual stress in metals, *Proc. Soc. Exp. Stress Anal.*, Vol.1 (2), p.81-90, 1944.
- [58]. Lu J., Retraint D., A review of recent developments and applications in the field of X-ray diffraction for residual stress studies, *J. Strain Anal.*, Vol. 33(2), p.127-36, 1998.
- [59]. Kim S.H., Kim J.B, Won-Jae Lee W.J., Numerical prediction and neutron diffraction measurement of the residual stresses for a modified 9Cr-1Mo steel weld, *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol.209 (8), p.3905-13, 2009.
- [60]. Dally, J. E., Rilley, W. F. "Experimental Stress Analysis" Editorial Mc Graw Hill. Tercera Edición. 1991. Pág. 5.
- [61]. Maloney, Timothy J.: "Electrónica Industrial Moderna", México, Ed. Pearson Educación, 2002.
- [62]. Window A.L.: *Strain Gauge Technology*. Elsevier Applied Science, USA, 1992.
- [63]. "Transductores electrónicos", España, Ed. Orbis/Marcombo. 1986.
- [64]. Figliola-Beasley, *Mediciones Mecánicas Teoría y Diseño*, Alfaomega Grupo Editor, México, 2003.
- [65]. Wyat J.E., Berry J.T., "A new technique for the determination of superficial residual stresses associated with machining and other manufacturing processes", *Journal of Materials Processing Technology*, vol.171, pp.132-140, (2006).
- [66]. Simes T.R., Mellor S.G., Hills D.A., A note on the influence of residual stress on measured hardness, research note, *J. Strain Anal.*, Vol.19(2), p.135 37, 1984.
- [67]. J. Campbell, Private Communication Between Professor Campbell and J.T. Berry, 2001.
- [68]. "Standard Practice for Production and Evaluation of Field Metallographic Replicas," E 512-87, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials.
- [69]. Struers distributor, RepliSet Instruction Manual Cat. No: 50900044, Date of Release 20.11.2003.
- [70]. Withers, P. and Bhadeshia, H.K.D.H., "Residual Stress Part 2 - Nature and Origins", *Materials Science and Technology*, vol. 17, pp. 356-375 (2004).

- [71]. Robinson, J.S. and Tanner, D.A., "The Magnitude of Heat Treatment Induced Residual Stresses and the Thermal Stress Relief of Aluminum Alloys", *Materials Science Forum*, vol. 404-407, pp. 355-360 (2002).
- [72]. Carrera, E., Rodriguez, A., Talamantes, J., Valtierra, S. and Colas, R., "Measurement of Residual Stresses in Cast Aluminum Engine Blocks", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 189, pp. 206-210 (2007).
- [73]. ASTM E112-10. Standard test methods for determining average grain size. *Annual Book of ASTM Standards, Section 3: Metals Test Methods and Analytical Procedures* (2010).
- [74]. ASTM E407-07 Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. *Annual Book of ASTM Standards* (2015).
- [75]. Lanciotti A., Lazzeri L., Polese C., Presentation at the Porto meeting of the European Union DaToN project, 2007.
- [76]. Cruise R.B., Gardner L., Strength enhancements induced during forming of stainless steel sections, *J. Construct. Steel Res.*, Vol. 64(11), p.1316-20, 2008.
- [77]. Bueckner H.F., The propagation of cracks and the energy of elastic deformation, *Trans. ASME*, Vol.80, p.1225-30, 1958.

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1.	Producción de aluminio [3].....	4
Tabla 2.2.	Propiedades del aluminio [2], [5].....	5
Tabla 2.3.	Solubilidad en sólido de elementos en el aluminio [7].....	6
Tabla 2.4.	Composición química característica del monobloque V8 de aluminio de aleación A319 (%P/P).....	7
Tabla 2.5.	Composición común de aleaciones aluminio-silicio. Elementos (%P/P); A: Molde de arena; M: Molde permanente; P: Fundición a alta presión [2].....	9
Tabla 2.6.	Características de aleaciones aluminio-silicio (1: Excelente; 5: Pésima) [2].....	9
Tabla 2.7.	Composición característica de la aleación de aluminio tipo A319 (%P/P).....	10
Tabla 2.8.	Lista de las reacciones durante la solidificación la aleación de aluminio A319 que contiene 0,08% en peso de Mg [27].....	15
Tabla 2.9.	Lista de las reacciones durante la solidificación la aleación de aluminio A319 que contiene 0,6% en peso de Mg [27] [27].....	16
Tabla 2.10.	Sistema de designación para tratamientos básicos en aleaciones de aluminio [29].....	18
Tabla 2.11.	Propiedades típicas de la aleación A319 [30].....	22
Tabla 2.12.	Valores de factores de galgas y sensibilidad transversal ^[63]	44
Tabla 2.13.	Sensibilidad a la tensión de algunos de los materiales utilizados para la construcción de galgas extensométricas [63].....	44
Tabla 2.14.	Tabla 2.14. Arreglos de puentes y su compensación.....	49
Tabla 2.15.	Datos técnicos del sistema de replicación metalográfica RepliSet F5.RepliSet F5.....	55
Tabla 3.1.	Configuraciones de indentaciones de la prueba F.....	81
Tabla 3.2.	Configuraciones de indentaciones de la prueba G.....	82
Tabla 4.1.	Composición química característica del monobloque V8 de aluminio de aleación A319 (%P/P).....	83
Tabla 4.2.	Evaluación microestructural del monobloque V8 del aluminio.....	84
Tabla 4.3.	Valores de la distribución de probabilidad para la Validación del Sistema de Replicación de Indentaciones.....	88
Tabla 4.4.	Medición de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones.....	92
Tabla 4.5.	Análisis de la varianza (ANOVA) de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba A.....	93
Tabla 4.5.	Valores de la distribución de probabilidad de esfuerzos residuales de la técnica de indentaciones y replicación de indentaciones.....	93
Tabla 4.6.	Medición de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba B.....	96

Tabla 4.7.	Análisis de la varianza (ANOVA) de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba B.....	96
Tabla 4.8.	Medición de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba C.....	98
Tabla 4.9.	Análisis de la varianza (ANOVA) de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba C.....	98
Tabla 4.10.	Medición de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba D.....	101
Tabla 4.11	Análisis de la varianza (ANOVA) esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba D.....	101
Tabla 4.12.	Medición de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba E.....	103
Tabla 4.13.	Análisis de la varianza (ANOVA) de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba E.....	103
Tabla 4.14.	Valores de la distribución de probabilidad de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y la técnica de replicación de indentaciones a 1.4 pulgadas.....	107
Tabla 4.15.	Medición de esfuerzos residuales de la Prueba A.....	108
Tabla 4.16.	Análisis de la varianza (ANOVA) de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y la técnica de replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba A.....	108
Tabla 4.17.	Medición de esfuerzos residuales mediante la Técnica de Galgas Extensométricas y la Técnica de Replicación de Indentaciones a 1.4 pulgadas (35.56 mm) de la Prueba B.....	112
Tabla 4.18.	Análisis de la varianza (ANOVA) de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y la técnica de replicación de indentaciones utilizando un punzón de centros calibrado a 1.4 plg de la Prueba B.....	112
Tabla 4.19	Medición de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y la técnica de replicación de indentaciones a 1.4 pulgadas (35.56 mm) de la Prueba C.....	115
Tabla 4.20.	Análisis de la varianza (ANOVA) de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba C.....	115
Tabla 4.21	Medición de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y la técnica de replicación de indentaciones a 1.4 pulgadas (35.56 mm) de la Prueba D.....	118
Tabla 4.22.	Análisis de la varianza (ANOVA) de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba D.....	118
Tabla 4.23	Medición de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y la técnica de replicación de indentaciones a 1.4 pulgadas (35.56 mm) de la Prueba E.....	121

Tabla 4.24.	Análisis de la varianza (ANOVA) de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba E.....	121
Tabla 4.25.	Medición de esfuerzos residuales mediante la técnica de replicación de indentaciones de la Prueba F.....	127
Tabla 4.26.	Configuraciones de indentaciones de la prueba F.....	128
Tabla 4.27.	Configuraciones de galgas extensométricas de la prueba F.....	132
Tabla 4.28.	Medición de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas de la Prueba F.....	133
Tabla 4.29.	Valores de la distribución de probabilidad de esfuerzos residuales en la Zona 6 con la Configuración B de la Prueba F.....	134
Tabla 4.30.	Valores de la distribución de probabilidad de esfuerzos residuales en la Zona 6 con la Configuración B de la Prueba F.....	137
Tabla 4.31.	Análisis de la varianza (ANOVA) de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones en la Zona 6 con la Configuración B de la Prueba F.....	137
Tabla 4.32.	Medición de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones de la Prueba G.....	140
Tabla 4.33.	Análisis de la varianza (ANOVA) de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones de la Prueba G.....	141
Tabla 4.34.	Valores de la distribución de probabilidad de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y la técnica de replicación de indentaciones de la Prueba G.....	143

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.	Diagrama de fases en equilibrio de Al-Si [8].....	8
Figura 2.2.	El extremo rica en aluminio del diagrama de fases Al-Ti [17].....	11
Figura 2.3.	Microestructura óptica. Aleación Al-12,5% Si. Estructura no modificada. X 200[26].....	11
Figura 2.4.	Estructuras del Silicio eutéctico modificado químicamente: a) Nivel 1 - Sin modificar, b) Nivel 2 – Laminar, c) Nivel 3 – Modificada Parcialmente, d) Nivel 4 – Ausente de Laminas, e) Nivel 5 – Fibrosa, f) Nivel 6 – Sobremodificada [22].....	12
Figura 2.5.	La relación entre EDS y el tiempo de solidificación (t_s) y velocidad de enfriamiento [17].....	13
Figura 2.6.	Variación del esfuerzo último y la elongación en función del tamaño de celda dendrítica [23].....	14
Figura 2.7.	Curva esfuerzo-deformación unitaria.....	23
Figura 2.8.	Clasificación de esfuerzo-residuales.....	26
Figura 2.9.	Contenido de carbón contra los parámetros de red en la austenita (retenida) y la martensita a temperatura ambiente, a en la parte superior de la gráfica es el parámetro de red de la austenita (f.c.c.), a y c en la parte baja de la gráfica con los parámetros de red de la martensita. Se presenta la razón c/a para la martensita como una función del contenido de carbón [36].....	28
Figura 2.10.	Sección de cilindro del motor que ilustra el fenómeno de escape de gases durante la operación. Algunos métodos de medición de esfuerzos residuales.....	31
Figura 2.11.	Técnicas de medición de esfuerzos residuales.....	32
Figura 2.12.	Esfuerzos producidos por procesos y rangos de profundidad que contribuyen a la falla del material.....	33
Figura 2.13.	Diagrama donde se ejemplifica el uso de la técnica Hole-drilling en aplicaciones de soldadura [42].....	35
Figura 2.14.	Método del seccionamiento [75].....	36
Figura 2.15.	Construcción de una Galga extensométrica (Micro-Measurements ® CEA-06-125UN-350).....	40
Figura 2.16.	Diferentes configuraciones de galgas a) de un elemento, b) de un elemento, c) de un elemento, d) roseta de dos elementos, e) roseta de dos elementos, f) roseta empalmada de dos elementos, g) roseta de tres elementos, h) roseta de tres elementos, i) roseta de tres elementos, j) roseta de tres elementos galga, k) galga compartida, l) galga de diagrama, m) roseta de dos elementos, n) galga alargada de un elemento, o) arreglo lineal de una galga de tensión múltiple [60].....	42
Figura 2.17.	a) Galga extensométrica activa, b) Galga extensométrica pasiva.....	45
Figura 2.18.	Puente de medida con una galga.....	46
Figura 2.19.	Arreglo de puente para compensar temperatura.....	48

- Figura 2.20. Ilustración de como la forma de la huella de microdureza puede cambiar cuando el material tiene un relevado de esfuerzos. (a) La muestra en forma de cruz pre-estresada y la indentación de micro-dureza realizada. (b) La indentación de micro-dureza se deforma una vez que los esfuerzos residuales son liberados [66].51
- Figura 2.21. Variación de la dureza medida después del relevado de cambio de esfuerzos elásticos con esfuerzo residual normalizado.....51
- Figura 2.22. Diagrama donde se muestra el comportamiento de las indentaciones de dureza cuando los esfuerzos residuales son relevados. (a) El par de indentaciones original, sin relevado de esfuerzos. (b) El cierre de la distancia entre indentaciones, lo cual indica que la superficie estaba a tensión antes del relevado de esfuerzos. (c) La expansión de la distancia entre indentaciones indica que la superficie estaba a compresión antes del relevado de esfuerzos.....53
- Figura 2.23. RepliSet F5, a) cartucho de 50 ml, b) boquilla estática de mezcla desechable, c) pistola dispensadora.....55
- Figura 2.24. Especificaciones de tiempo de curado de RepliSet F5.....56
- Figura 2.25. a) Un operador distribuye RepliSet en una superficie, b) Un operador retira la réplica curada.....56
- Figura 3.1. Diagrama de bloques del procedimiento experimental.....58
- Figura 3.2. a) Camisas de hierro gris, b) Monobloque V8 de aluminio, c) Puente entre cilindros.....59
- Figura 3.3. Zona seleccionada del puente entre cilindros para el estudio de caracterización microestructural.....60
- Figura 3.4. Maquina lijadora-pulidora para preparación de muestras.....61
- Figura 3.5. a) Microscopio óptico, b) Estereoscopio.....62
- Figura 3.6. a) Desbaste con turbina neumática y lija, b) Aplicación de solución acida acondicionadora, c) Acabado fino con papel de lija, d) Aseo de los puentes entre cilindros.....65
- Figura 3.7. a) Aplicación de solución neutralizadora, b) Aseo con cotonetes, c) Marcaje con lápiz del centro del puente entre cilindros.....66
- Figura 3.8. a) Manejo de la galga extensométrica con pinzas, b) Uso de la cinta adhesiva especial, c) Transportación de la galga extensométrica con ayuda de la cita adhesiva.....67
- Figura 3.9. Colocación de la cinta con la galga apoyado con las referencias en el centro del puente entre cilindros, b) Aplicación de catalizador en la superficie opaca expuesta de la galga, c) Aplicación de una o dos gotas de adhesivo en la unión de la cinta adhesiva y el puente entre cilindros, d) Presionar la cinta adhesiva.....68
- Figura 3.10. a) Galga perfectamente adherida al puente entre cilindros, b) Retiro de la cinta adhesiva, c) Presentación del extremo en el que no se separó las puntas blanca y negra sobre estos, con la punta roja al lado izquierdo en los dos puntos de conexión de la galga extensométrica, d) Aplicación de soldadura en plata suficiente sobre las puntas de los cables uniéndolos a los dos puntos de conexión de la galga, e) Aplicación de recubrimiento protector sobre las terminales soldadas y también sobre el área de la galga.....69

Figura 3.11.	Equipo de Computo e interfase para la medición de microdeformación....	70
Figura 3.12.	Medición de las señales de voltaje mediante un puente Wheatstone para la medición de microdeformación antes del relevado de esfuerzos (ϵ_0).....	70
Figura 3.13.	Protección de las galgas extensométricas previo al corte de la sierra cinta.....	71
Figura 3.14.	a) Cierra cinta de corte, b) Corte de los puentes entre cilindros del monobloque V8 de aluminio, c) Puente entre cilindros cortado.....	71
Figura 3.15.	Medición de las señales de voltaje que mediante un puente Wheatstone para la medición de microdeformación después del relevado de esfuerzos (ϵ_1).....	82
Figura 3.16.	a) Marcaje con lápiz del centro del puente entre cilindros, b) Colocación y orientación del punzón de dureza de 1.4 pulgadas (35.56 mm), c) Indentaciones en los puentes entre cilindro.....	74
Figura 3.17.	a) Orientación horizontal del monobloque V8 de aluminio, b) Aplicación del sistema de replicación cubriendo el área circundante a las indentaciones hechas por el punzón de centros.....	75
Figura 3.18.	a) Tiempo de curado (18 minutos a 25°C), b) Remoción de las réplicas de resina de los puentes entre cilindros.....	75
Figura 3.19.	a) Cierra cinta de corte, b) monobloque V8 de aluminio sin los puentes entre cilindros del, c) Puente entre cilindros relevado.....	76
Figura 3.20.	a) Aplicación del sistema de replicación de indentaciones en los puentes entre cilindros después del relevado de esfuerzos, b) Réplicas de indentación antes y después del relevado de esfuerzos (ϵ_0 y ϵ_1).....	76
Figura 3.21.	Replicación de indentación a 50X.....	77
Figura 3.22.	Analizador de imagen (Zeiss ® AxioVision) y microscopio óptico (Zeiss ® Axio Oberver Z1).....	78
Figura 3.23.	Medición inicial entre pares de indentaciones (ϵ_0).....	78
Figura 3.24.	Medición final entre pares de indentaciones (ϵ_1).....	79
Figura 3.25.	a) Replicación de Indentación en los puentes entre cilindros a 50X, b) Indentación a 50x en los puentes entre cilindros.....	80
Figura 3.26.	Configuraciones A y B de indentaciones de la prueba F.....	81
Figura 3.27.	Configuraciones C de indentaciones de la prueba G.....	81
Figura 4.1.	a) Zona de análisis en el puente entre cilindros después del relevado de esfuerzo, b) Muestra pulida para la observación microscópica, c) Muestra atacada con solución Keller.....	84
Figura 4.2.	Microestructura característica a 50X del puente entre cilindros.....	85
Figura 4.3.	Nivel de modificación de la fase eutéctica de silicio entre 2 y 3 (AFS) [17] a 100X del puente entre cilindros.....	85
Figura 4.4.	Tamaño de grano fino 342.89 μm (AFS) a 100X del puente entre cilindros (ASTM E112)	86
Figura 4.5.	Gráfica de valores individuales para la Validación del Sistema de Replicación de Indentaciones después del relevado de esfuerzos.....	87
Figura 4.6.	Gráfica de Probabilidad para la Validación del Sistema de Replicación de Indentaciones después del relevado de esfuerzos de la Prueba A.....	89
Figura 4.7.	Gráfica de Probabilidad para la Validación del Sistema de Replicación de Indentaciones después del relevado de esfuerzos de la Prueba B.....	89

Figura 4.8.	Gráfica de Probabilidad para la Validación del Sistema de Replicación de Indentaciones después del relevado de esfuerzos de la Prueba C.....	90
Figura 4.9.	Gráfica de Probabilidad para la Validación del Sistema de Replicación de Indentaciones después del relevado de esfuerzos de la Prueba D.....	90
Figura 4.10.	Gráfica de Probabilidad para la Validación del Sistema de Replicación de Indentaciones después del relevado de esfuerzos de la Prueba D.....	91
Figura 4.11.	Gráfica de valores individuales de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba A.....	93
Figura 4.12.	Gráfica de intervalos de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba A.....	94
Figura 4.13.	Gráfica de caja de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba A.....	94
Figura 4.14.	Distribución de probabilidad de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba A.....	95
Figura 4.15.	Gráfica de valores individuales de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba B.....	96
Figura 4.16.	Gráfica de intervalos de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba B.....	97
Figura 4.17.	Gráfica de caja de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba B.....	97
Figura 4.18.	Distribución de probabilidad de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba B.....	98
Figura 4.19.	Gráfica de valores individuales de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba C.....	99
Figura 4.20.	Gráfica de intervalos de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba C.....	99
Figura 4.21.	Gráfica de caja de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba C.....	100
Figura 4.22.	Distribución de probabilidad de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba C.....	100
Figura 4.23.	Gráfica de vales individuales esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba D.....	101
Figura 4.24.	Gráfica de intervalos esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba D.....	102
Figura 4.25.	Gráfica de caja esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba D.....	102
Figura 4.26.	Distribución de probabilidad esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba D.....	103
Figura 4.27.	Gráfica de valores individuales de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba E.....	104
Figura 4.28.	Gráfica de intervalos de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba E.....	104
Figura 4.29.	Gráfica de caja de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba E.....	105
Figura 4.30.	Distribución de probabilidad de esfuerzos residuales para la validación del sistema de replicación de indentaciones de la Prueba E.....	105
Figura 4.31.	a) Distancia entre indentaciones, b) Campo de esfuerzos.	105

Figura 4.32.	Gráfica de valores individuales de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba A.....	109
Figura 4.33.	Gráfica de intervalos de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba A.....	110
Figura 4.34.	Gráfica de caja de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba A.....	110
Figura 4.35.	Distribución de probabilidad de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba A.....	111
Figura 4.36.	Gráfica de valores individuales de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba B.....	113
Figura 4.37.	Gráfica de intervalos de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba B.....	113
Figura 4.38.	Gráfica de caja de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba B.....	114
Figura 4.39.	Distribución de probabilidad de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba B.....	114
Figura 4.40.	Gráfica de valores individuales de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba C.....	116
Figura 4.41.	Gráfica de intervalos individuales de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba C.....	116
Figura 4.42.	Gráfica de caja de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba C.....	117
Figura 4.43.	Distribución de probabilidad de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba C.....	117
Figura 4.44.	Gráfica de valores individuales de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba D.	119
Figura 4.45.	Gráfica de intervalos de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba D.....	119
Figura 4.46.	Gráfica de caja de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba D.....	120

Figura 4.47.	Distribución de probabilidad de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba D.....	120
Figura 4.48.	Gráfica de valores individuales de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba E.....	122
Figura 4.49.	Gráfica de intervalos de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba E.....	122
Figura 4.50.	Gráfica de caja de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba E.....	123
Figura 4.51.	Distribución de probabilidad de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones a 1.4 plg de la Prueba E.....	123
Figura 4.52.	Gráfica de matriz de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y la técnica de replicación de indentaciones a 1.4 plg.....	124
Figura 4.53.	Campo de esfuerzos en los puentes entre cilindros.....	125
Figura 4.54.	Gráfica de valores individuales para el apeo de campos de esfuerzos residuales mediante la técnica de replicación de indentaciones de la Prueba F.....	126
Figura 4.55.	Configuraciones A y B de indentaciones de la prueba F.....	128
Figura 4.56.	Gráfica de valores individuales de esfuerzos residuales mediante la técnica de replicación de indentaciones en el puente entre cilindros 1-3 con la Configuración A de la Prueba F.....	129
Figura 4.57.	Gráfica de valores individuales de esfuerzos residuales mediante la técnica de replicación de indentaciones en el puente entre cilindros 3-5 con la Configuración B de la Prueba F.....	129
Figura 4.58.	Gráfica de valores individuales de esfuerzos residuales mediante la técnica de replicación de indentaciones en el puente entre cilindros 5-7 con la Configuración A de la Prueba F.....	130
Figura 4.59.	Gráfica de valores individuales de esfuerzos residuales mediante la técnica de replicación de indentaciones en el puente entre cilindros 2-4 con la Configuración A de la Prueba F.....	130
Figura 4.60.	Gráfica de valores individuales de esfuerzos residuales mediante la técnica de replicación de indentaciones en el puente entre cilindros 4-6 con la Configuración B de la Prueba F.....	131
Figura 4.61.	Gráfica de valores individuales de esfuerzos residuales mediante la técnica de replicación de indentaciones en el puente entre cilindros 6-8 con la Configuración A de la Prueba F.....	131
Figura 4.62.	Configuraciones A y B de indentaciones de la prueba F.....	133
Figura 4.63.	Gráfica de valores individuales de esfuerzos residuales en la Zona 1 con la Configuración A de la Prueba F.....	134
Figura 4.64.	Gráfica de probabilidad de esfuerzos residuales en la Zona 1 con la Configuración A de la Prueba F.....	135

Figura 4.65.	Gráfica de valores individuales de esfuerzos residuales en la Zona 2 con la Configuración B de la Prueba F.....	136
Figura 4.66.	Gráfica de probabilidad de esfuerzos residuales en la Zona 2 con la Configuración B de la Prueba F.....	136
Figura 4.67.	Gráfica de valores individuales de esfuerzos residuales en la Zona 6 con la Configuración B de la Prueba F.....	138
Figura 4.68.	Gráfica de valores individuales de esfuerzos residuales en la Zona 2 con la Configuración B de la Prueba F.....	138
Figura 4.69.	Gráfica de caja de esfuerzos residuales en la Zona 2 con la Configuración B de la Prueba F.....	139
Figura 4.70.	Gráfica de probabilidad de esfuerzos residuales en la Zona 6 con la Configuración B de la Prueba F.....	139
Figura 3.71.	Configuraciones C de indentaciones de la prueba G.....	140
Figura 4.72.	Gráfica de valores individuales de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones de la Prueba G.....	141
Figura 4.73.	Gráfica de intervalos de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones de la Prueba G.....	142
Figura 4.74.	Gráfica de caja de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones de la Prueba G.....	142
Figura 4.75.	Gráfica de probabilidad de esfuerzos residuales mediante la técnica de galgas extensométricas y replicación de indentaciones de la Prueba G.....	143

APÉNDICE

A.1. Técnica de Galgas Extensométricas de las Pruebas (A, B, C, D y E)

Técnica de Galgas Extensométricas					
Prueba	Puente entre Cilindros	ε_0 ($\times 10^{-6}$)	ε_1 ($\times 10^{-6}$)	$\Delta\varepsilon$ ($\times 10^{-6}$)	Esfuerzo Residual (MPa)
A	1-3	542.0	-612.0	1154.0	80.78
	3-5	678.0	-456.0	1134.0	79.38
	5-7	463.0	-664.0	1127.0	78.89
	2-4	781.0	-330.0	1111.0	77.77
	4-6	367.0	-776.0	1143.0	80.01
	6-8	780.0	-394.0	1174.0	82.18
B	1-3	429.0	-616.0	1045.0	73.15
	3-5	386.0	-651.0	1037.0	72.59
	5-7	373.0	-656.0	1029.0	72.03
	2-4	710.0	-310.0	1020.0	71.40
	4-6	37.0	-993.0	1030.0	72.10
	6-8	1019.0	-23.0	1042.0	72.94
C	1-3	528.0	-585.0	1113.0	77.91
	3-5	288.0	-827.0	1115.0	78.05
	5-7	134.0	-1049.0	1183.0	82.81
	2-4	274.0	-755.0	1029.0	72.03
	4-6	268.0	-825.0	1093.0	76.51
	6-8	61.0	-1024.0	1085.0	75.95
D	1-3	380.0	-618.0	998.0	69.86
	3-5	304.0	-787.0	1091.0	76.37
	5-7	169.0	-892.0	1061.0	74.27
	2-4	472.0	-467.0	939.0	65.73
	4-6	28.0	-933.0	961.0	67.27
	6-8	190.0	-831.0	1021.0	71.47
E	1-3	226.0	-758.0	984.0	68.88
	3-5	194.0	-750.0	944.0	66.08
	5-7	50.0	-921.0	971.0	67.97
	2-4	381.0	-617.0	998.0	69.86
	4-6	524.0	-458.0	982.0	68.74
	6-8	571.0	-408.0	979.0	68.53

A.2. Técnica de Indentaciones de las Pruebas (A, B, C, D y E)

Técnica de Indentaciones					
Prueba	Puente entre Cilindros	ε_0 (μm)	ε_1 (μm)	$\Delta\varepsilon$ (μm)	Esfuerzos Residuales (MPa)
A	1-3	35556.35	35528.65	27.69	54.52
	3-5	35556.35	35527.88	28.47	56.04
	5-7	35556.35	35529.15	27.19	53.54
	2-4	35556.35	35528.06	28.29	55.68
	4-6	35556.35	35529.90	26.44	52.06
	6-8	35556.35	35528.59	27.76	54.64
B	1-3	35556.35	35532.25	24.10	47.44
	3-5	35556.35	35532.28	24.07	47.38
	5-7	35556.35	35531.81	24.54	48.30
	2-4	35556.35	35529.90	26.44	52.06
	4-6	35556.35	35531.81	24.54	48.30
	6-8	35556.35	35530.67	25.68	50.55
C	1-3	35556.35	35529.83	26.51	52.20
	3-5	35556.35	35531.68	24.67	48.56
	5-7	35556.35	35530.72	25.63	50.45
	2-4	35556.35	35530.73	25.61	50.43
	4-6	35556.35	35530.73	25.61	50.43
	6-8	35556.35	35530.46	25.89	50.96
D	1-3	35556.35	35532.59	23.76	46.77
	3-5	35556.35	35531.90	24.44	48.13
	5-7	35556.35	35532.85	23.50	46.25
	2-4	35556.35	35531.95	24.40	48.03
	4-6	35556.35	35531.73	24.61	48.46
	6-8	35556.35	35531.65	24.69	48.62
E	1-3	35556.35	35532.45	23.90	47.05
	3-5	35556.35	35531.68	24.67	48.56
	5-7	35556.35	35533.39	22.96	45.20
	2-4	35556.35	35530.98	25.36	49.94
	4-6	35556.35	35536.32	20.03	39.42
	6-8	35556.35	35535.63	20.72	40.78

A.3. Técnica de Replicación de Indentaciones de las Pruebas (A, B, C, D y E)

Técnica de Replicación de Indentaciones					
Prueba	Puente entre Cilindros	ϵ_0 (μm)	ϵ_1 (μm)	$\Delta\epsilon$ (μm)	Esfuerzos Residuales (MPa)
A	1-3	35558.55	35530.63	27.92	54.96
	3-5	35558.55	35529.79	28.76	56.61
	5-7	35558.55	35531.18	27.37	53.87
	2-4	35558.55	35530.08	28.47	56.04
	4-6	35558.55	35531.84	26.71	52.57
	6-8	35558.55	35530.52	28.03	55.17
B	1-3	35558.55	35534.04	24.51	48.24
	3-5	35558.55	35534.32	24.23	47.69
	5-7	35558.55	35533.88	24.67	48.56
	2-4	35558.55	35531.91	26.64	52.44
	4-6	35558.55	35533.71	24.84	48.89
	6-8	35558.55	35532.63	25.92	51.02
C	1-3	35558.55	35531.66	26.89	52.93
	3-5	35558.55	35533.64	24.91	49.03
	5-7	35558.55	35532.66	25.89	50.96
	2-4	35558.55	35532.64	25.91	51.00
	4-6	35558.55	35532.64	25.91	51.00
	6-8	35558.55	35532.39	26.16	51.49
D	1-3	35558.55	35534.48	24.07	47.38
	3-5	35558.55	35533.96	24.59	48.40
	5-7	35558.55	35534.77	23.78	46.81
	2-4	35558.55	35533.92	24.63	48.48
	4-6	35558.55	35533.75	24.80	48.81
	6-8	35558.55	35533.74	24.81	48.83
E	1-3	35558.55	35534.34	24.21	47.65
	3-5	35558.55	35533.73	24.82	48.85
	5-7	35558.55	35535.39	23.16	45.59
	2-4	35558.55	35533.09	25.46	50.11
	4-6	35558.55	35534.26	24.29	47.81
	6-8	35558.55	35533.71	24.84	48.89

A.4. Técnica de Galgas Extensométricas de las Pruebas F

Técnica de Galgas Extensométricas							
Prueba	Puente entre Cilindros	Configuración	Zona	ε_0 ($\times 10^{-6}$)	ε_1 ($\times 10^{-6}$)	$\Delta\varepsilon$ ($\times 10^{-6}$)	Esfuerzo Residual (MPa)
F	1-3	A	1	267.0	-725.1	992.1	69.45
	3-5	B	2	-51.0	-1028.0	977.0	68.39
	3-5	B	6	345.0	-241.0	586.0	41.02
	5-7	A	1	673.0	-327.2	1000.2	70.01
	2-4	A	1	467.0	-535.4	1002.4	70.17
	4-6	B	2	-83.0	-1081.2	998.2	69.87
	4-6	B	6	-33.0	-629.4	596.4	41.75
	6-8	A	1	858.0	-159.6	1017.6	71.23

A.5. Técnica de Replicación de Indentaciones de las Pruebas F

Técnica de Replicación de Indentaciones							
Prueba	Puente entre Cilindros	Configuración	Zona	ε_0 (μm)	ε_1 (μm)	$\Delta\varepsilon$ (μm)	Esfuerzos Residuales (MPa)
F	1-3	A	1	11932.62	11921.27	11.35	66.58
			3	24014.21	23992.18	22.03	64.22
			4	35556.35	35530.08	26.26	51.71
			5	42575.15	42547.05	28.10	46.20
	3-5	B	2	13727.62	13715.48	12.14	61.90
			4	35556.35	35530.10	26.25	51.67
			6	21827.49	21814.62	12.87	41.26
	5-7	A	1	12383.45	12371.55	11.90	67.27
			3	24280.66	24261.60	19.06	54.95
			4	35556.35	35530.33	26.01	51.22
			5	42617.28	42588.71	28.57	46.93
	2-4	A	1	11044.64	11033.95	10.69	67.75
			3	24114.74	24094.49	20.25	58.78
			4	35556.35	35530.18	26.17	51.51
			5	41645.58	41619.58	26.00	43.70
	4-6	B	2	13630.39	13618.19	12.20	62.65
			4	35556.35	35530.08	26.26	51.71
			6	21925.32	21911.89	13.43	42.88
	6-8	A	1	11157.57	11146.69	10.88	68.26
			3	23715.37	23695.59	19.78	58.38
4			35556.35	35530.14	26.21	51.59	
5			41334.99	41309.33	25.66	43.45	

A.6. Técnica de Galgas Extensométricas de las Pruebas G

Técnica de Galgas Extensométricas					
Prueba	Puente entre Cilindros	ϵ_0 ($\times 10^{-6}$)	ϵ_1 ($\times 10^{-6}$)	$\Delta\epsilon$ ($\times 10^{-6}$)	Esfuerzo Residual (MPa)
G	1-3	735.0	-353.0	1088.0	76.16
	3-5	459.0	-624.0	1083.0	75.81
	5-7	368.0	-730.0	1098.0	76.86
	2-4	601.0	-493.0	1094.0	76.58
	4-6	648.0	-438.0	1086.0	76.02
	6-8	521.0	-563.0	1084.0	75.88

A.7. Técnica de Replicación de Indentaciones de las Pruebas G

Técnica de Replicación de Indentaciones					
Prueba	Puente entre Cilindros	ϵ_0 (μm)	ϵ_1 (μm)	$\Delta\epsilon$ (μm)	Replicación de Indentaciones (MPa)
G	1-3	10317.32	10306.04	11.28	76.53
	3-5	10126.79	10115.75	11.04	76.31
	5-7	10136.21	10125.10	11.11	76.72
	2-4	10156.55	10145.40	11.15	76.85
	4-6	10245.86	10234.69	11.17	76.31
	6-8	10218.15	10207.04	11.11	76.11