

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA

**MÉTODO NORMALIZADO “PINHOLE IMAGING” EN LA
DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE FOCO DE UN EQUIPO DE
RAYOS X PARA LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE
IMÁGENES RADIOGRÁFICAS DE JUNTAS SOLDADAS**

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MAGÍSTER (MSc) EN
INGENIERÍA MECÁNICA
MENCIÓN EN MATERIALES Y PROCESOS DE MANUFACTURA**

ING. BOLÍVAR MAURICIO CELY VÉLEZ

mauricio.cely@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. WILLAN LEOPOLDO MONAR MONAR, MSc

william.monar@epn.edu.ec

Quito, Julio de 2016

DECLARACIÓN

Yo, Bolívar Mauricio Cely Vélez, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Ing. Mauricio Cely

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por el Señor Ingeniero Bolívar Mauricio Cely Vélez bajo nuestra supervisión.

Ing. Willan Monar, MSc
DIRECTOR DE PROYECTO

Ing. Verónica Sotomayor, MSc
CO-DIRECTORA DE PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

A la EPN.

DEDICATORIA

A mi madrecita linda. Ahora es un ángel que nos cuida desde el cielo.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	xii
PRESENTACIÓN	xiv
CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 RAYOS X	3
1.1.1 TUBO DE RAYOS X.....	3
1.1.2 EL ÁNODO	4
1.1.2.1 Enfriamiento del ánodo.....	5
1.2 TAMAÑO DE FOCO.....	5
1.2.1 PUNTO FOCAL (FOCAL SPOT)	5
1.2.2 TAMAÑO DE FOCO REAL O PUNTO FOCAL ACTUAL	6
1.2.3 TAMAÑO EFECTIVO DEL PUNTO FOCAL	7
1.3 PENUMBRA GEOMÉTRICA.....	7
1.3.1 PRINCIPIOS GEOMÉTRICOS EN LA FORMACIÓN DE IMAGEN	8
1.3.2 MÉTODO “PINHOLE IMAGING” DE AGUJERO DE ALFILER.....	9
1.4 NORMAS DE REFERENCIA	11
1.5 EVALUACIÓN DE RADIOGRAFÍAS	12
1.5.1 PENUMBRA GEOMÉTRICA	12
1.5.2 INDICADORES DE CALIDAD	13
1.5.3 DENSIDAD DE IMAGEN RADIOGRÁFICA.....	13
1.5.3.1 Características de una imagen radiográfica	13
1.5.3.2 Valores adecuados de densidad radiográfica.....	14
1.6 ESTADO DEL ARTE	14
CAPÍTULO 2	22
MATERIALES Y EQUIPOS	22
2.1 EQUIPO DE RAYOS X	22
2.1.1 PANEL DE CONTROL	22
2.1.2 TUBO DE RAYOS CATÓDICOS	23

2.2	CUARTO OSCURO	24
2.3	PELÍCULA RADIOGRÁFICA.....	24
2.4	BROCAS	25
2.5	PROBETAS DE PLOMO.....	27
CAPÍTULO 3		28
DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE FOCO.....		28
3.1	PROBETAS A ENSAYAR	28
3.1.1	PROCESO DE OBTENCIÓN DE LAS PROBETAS	30
3.1.1.1	Proceso de conformado mecánico	31
3.1.1.2	Proceso de maquinado.....	32
3.2	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL DEL ENSAYO.....	32
3.2.1	DATOS IMPORTANTES A TOMAR EN CUENTA.....	33
3.2.1.1	Factor de magnificación	33
3.2.2	REALIZACIÓN DEL ENSAYO	35
3.2.3	RESUMEN DE LOS PASOS PARA REALIZAR EL ENSAYO	36
3.3	RESULTADOS OBTENIDOS.....	37
3.3.1	DATOS DE LAS FOTOGRAFÍAS TOMADAS	38
3.3.2	DATOS DEL TAMAÑO DE FOCO (FOCAL SPOT).....	41
3.4	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS.....	44
3.4.1	DISTRIBUCIÓN T.....	45
CAPÍTULO 4		55
OBTENCIÓN DE LA PENUMBRA GEOMÉTRICA		55
4.1	PROCEDIMIENTO EFECTUADO	55
4.1.1	PRINCIPIO DEL MÉTODO.....	55
4.1.2	DESARROLLO DEL MÉTODO.....	56
4.1.2.1	Ejemplo de cálculo	59
4.2	PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS Y ERROR OBTENIDO....	60

CAPÍTULO 5	62
DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	62
5.1 DE LA DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE FOCO	62
5.2 DE LA OBTENICÓN DE LA PENUMBRA GEOMÉTRICA	65
CAPÍTULO 6	67
CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	67
6.1 CONCLUSIONES.....	67
6.2 RECOMENDACIONES	70
6.3 TRABAJOS FUTUROS	71
CAPÍTULO 7	72
REFERENCIAS.....	72
ANEXOS	74
ANEXO 1: MANUAL DEL EQUIPO DE RAYOS X	75
ANEXO 2: ENSAYO POR ABSORCIÓN ATÓMICA	81
ANEXO 3: CURVA DE POTENCIA DEL EQUIPO	82
ANEXO 4: MEDIDAS TAMAÑO DE FOCO (70 TOMAS).....	83
ANEXO 5: REGISTRO DE ENSAYOS REALIZADOS	89
ANEXO 6: VALORES T PARA UNA ÁREA DE DOS COLAS	91
ANEXO 7: GRÁFICAS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	92
ANEXO 8: DIMENSIONES Y ESQUEMAS DE PROBETAS SOLDADAS	100

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1. 1. Porción del espectro electromagnético. Longitudes de onda en Angstroms	3
Figura 1. 2. Ejemplos de tubos de rayos catódicos	3
Figura 1. 3. Esquema de la producción de rayos X.....	4
Figura 1. 4. Tamaño efectivo del punto focal	6
Figura 1. 5. Representación de la relación entre el área real del punto focal (área del bombardeo) y punto focal efectivo, considerando una inclinación de 20 ° ...	7
Figura 1. 6. Representación de la penumbra geométrica y elementos	8
Figura 1. 7. Ilustraciones de los principios geométricos de formación de imagen	9
Figura 1. 8. Esquema de realización del método de agujero de alfiler (pinhole)	10
Figura 1. 9. Imagen del punto focal. Corta exposición (izquierda) y exposición prolongada (derecha).....	11
Figura 1. 10. Medición de la imagen del punto focal. Ejemplo de imagen sin mediciones (Izquierda) y Ejemplo de la imagen con mediciones (derecha).....	12
Figura 1. 11. Geometría utilizada para la obtención del tamaño del punto focal	16

CAPÍTULO 3

Figura 3. 1. Configuración de una toma radiográfica según su espesor	30
Figura 3. 2. Esquema de la realización del ensayo	33
Figura 3. 3. Representación del factor de magnificación.....	34
Figura 3. 4. Interfaz del programa ISee sugerido por la designación ASTM E1165 - 12.....	41
Figura 3. 5. Dimensiones del tamaño de foco tomadas del programa ISee	42
Figura 3. 6. Detalle de foco, objeto y penumbra geométrica	53
Figura 3. 7. Dimensiones del foco del equipo.....	53

CAPÍTULO 4

Figura 4. 1. Esquema de los principios geométricos de la penumbra geométrica.	56
Figura 4. 2. Esquema de parámetros que intervienen en la penumbra geométrica	57
Figura 4. 3. Esquema de parámetros que intervienen en la penumbra geométrica considerando el espesor como distancia objeto - detector.....	58

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

CAPÍTULO 2

Fotografía 2. 1. Panel o valija de control del laboratorio de END	23
Fotografía 2. 2. Tubo de rayos catódicos del laboratorio de END	23
Fotografía 2. 3. Cuarto oscuro del laboratorio de END	24
Fotografía 2. 4. Película radiográfica.....	25
Fotografía 2. 5. Brocas de diámetros 0.1 mm, 0.2 mm, 0.3 mm y 0.4 mm.....	25
Fotografía 2. 6. Broca de 0,1 mm de diámetro	26
Fotografía 2. 7. Probetas de plomo de espesor 1,3 mm	27

CAPÍTULO 3

Fotografía 3. 1. Set de probetas de plomo de diferentes medidas, tanto en diámetro con en espesor.....	28
Fotografía 3. 2. Lingote de plomo a ser fundido	31
Fotografía 3. 3. Laminado	31
Fotografía 3. 4. Maquinado de orificio.....	32
Fotografía 4. 5. Realización dl ensayo en el laboratorio de END	35
Fotografía 4. 6. Distancias m y n para el ensayo desarrollado.....	36

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 1

Tabla 1. 1. Valores de densidad y contraste de una película típica radiográfica	14
--	----

CAPÍTULO 2

Tabla 2. 1. Características del tubo de rayos X.....	24
Tabla 2. 2. Datos de las brocas a emplearse según el diámetro.....	26

CAPÍTULO 3

Tabla 3. 1. Dimensiones de las probetas a ensayar.....	29
Tabla 3. 2. Factores de magnificación según la designación E1165 - 12.....	34
Tabla 3. 3. Datos obtenidos de las fotografías de las radiografías (Tomas 1 – 10)	38
Tabla 3. 4. Datos obtenidos de las fotografías de las radiografías (Tomas 11 – 20).....	38
Tabla 3. 5. Datos obtenidos de las fotografías de las radiografías (Tomas 21 – 30).....	39
Tabla 3. 6. Datos obtenidos de las fotografías de las radiografías (Tomas 31 – 40).....	39
Tabla 3. 7. Datos obtenidos de las fotografías de las radiografías (Tomas 41 – 50).....	40
Tabla 3. 8. Datos obtenidos de las fotografías de las radiografías (Tomas 51 – 60).....	40
Tabla 3. 9. Datos obtenidos de las fotografías de las radiografías (Tomas 61 – 70).....	40
Tabla 3. 10. Datos obtenidos del tamaño de foco – Tomas 1 – 10 (izquierda) y 11 – 20 (derecha).....	42

Tabla 3. 11. Datos obtenidos del tamaño de foco – Tomas 21 – 30 (izquierda) y 31 – 40 (derecha).....	43
Tabla 3. 12. Datos obtenidos del tamaño de foco – Tomas 41 – 50 (izquierda) y 51 – 60 (derecha).....	43
Tabla 3. 13. Datos obtenidos del tamaño de foco – Tomas 61 – 70	43
Tabla 3. 14. Resultados estadísticos para análisis en X y en Y (Tomas 1-10). 47	
Tabla 3. 15. Datos filtrados en X y en Y (Tomas 1-10).....	47
Tabla 3. 16. Resultados estadísticos para análisis en X y en Y (Tomas 11-20)48	
Tabla 3. 17. Datos filtrados en X y en Y (Tomas 11-20).....	48
Tabla 3. 18. Resultados estadísticos para análisis en X y en Y (Tomas 21-30)49	
Tabla 3. 19. Datos filtrados en X y en Y (Tomas 21-30).....	49
Tabla 3. 20. Resultados estadísticos para análisis en X y en Y (Tomas 31-40)49	
Tabla 3. 21. Datos filtrados en X y en Y (Tomas 31-40).....	49
Tabla 3. 22. Resultados estadísticos para análisis en X y en Y (Tomas 41-50)50	
Tabla 3. 23. Datos filtrados en X y en Y (Tomas 41-50).....	50
Tabla 3. 24. Resultados estadísticos para análisis en X y en Y (Tomas 51-60)50	
Tabla 3. 25. Datos filtrados en X y en Y (Tomas 51-60).....	50
Tabla 3. 26. Resultados estadísticos para análisis en X y en Y (Tomas 61-70)51	
Tabla 3. 27. Datos filtrados en X y en Y (Tomas 61-70).....	51
Tabla 3. 28. Datos de los promedios de los lotes en X y en Y	51
Tabla 3. 29. Resultados estadísticos para análisis en X y en Y del promedio de los lotes	52
Tabla 3. 30. Datos filtrados en X y en Y del promedio de los lotes	52

CAPÍTULO 4

Tabla 4. 1. Valores límites de penumbra geométrica recomendados en el código ASME V 2010.....	59
Tabla 4. 2. Valores del error obtenido de la penumbra geométrica de las 19 probetas soldadas	60

RESUMEN

El proyecto presentado describe el procedimiento seguido para determinar el tamaño de foco del equipo de rayos X del Laboratorio de Ensayos No Destructivos de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional para evaluar la calidad de imágenes radiográficas de juntas soldadas según la utilización de normativas internacionales pertinentes y de trabajos relacionados en el área.

Para el capítulo 1, se da a conocer la introducción al tema planteado, haciendo énfasis en la importancia que tiene la determinación del tamaño del foco de equipos de rayos X. Continuando con una breve revisión de definiciones básicas concernientes a los rayos X y de las variables que son útiles en el trabajo aquí descrito. Así mismo, se plantea una parte donde se revisan criterios en los que se basan las normativas internacionales en lo concerniente a la determinación del tamaño del foco de equipos de rayos X. También, se revisa la importancia de la evaluación de películas radiográficas, así como de conocer los criterios en los que se basan las normas para poder establecer que si una imagen cumple con valores aceptados de penumbra geométrica. Además, se hace referencia a un estado del arte, revisando trabajos en el área y dando a conocer los aportes de estos a la ciencia en general, así como a este trabajo. Es necesario notar que los trabajos relacionadas hacen posible tener un fundamento teórico de cómo se puede proceder para determinar el tamaño de foco de un equipo de rayos X. Como adicional a esta parte, se hace el planteamiento de los alcances obtenidos con el desarrollo de este trabajo, permitiendo saber cuál es el aporte adicional que se desea brindar a la comunidad.

En el capítulo 2, da a conocer los materiales y equipos necesarios en la elaboración del ensayo para determinar el tamaño del foco del equipo de rayos X del laboratorio de Ensayos No Destructivos. También, se hace un recuento del equipo generador de rayos X, así como de los insumos como es la película radiográfica a utilizarse, así como también, el cuarto de revelado que se emplea para obtener las imágenes que serán evaluadas.

En el capítulo 3, se desarrolla el procedimiento para la obtención del tamaño de foco. Así mismo, se realizará un análisis estadístico de los datos obtenidos para dar a conocer el valor estadístico experimental del tamaño real del foco que se tiene con el ensayo aplicado.

Para el capítulo 4, se presenta los cálculos para la obtención de la penumbra geométrica con los datos de tamaño de foco obtenidos en probetas soldadas de diferente espesor y geometría. Además, de dar a conocer el error relativo que se tiene actualmente considerando el tamaño de foco obtenido experimentalmente con el tamaño de foco del manual de operación del equipo de radiografía industrial del laboratorio.

Finalmente, en el capítulo 5, se realiza la discusión de los resultados del ensayo realizado dando a conocer las ventajas que se tienen con la determinación del tamaño del foco efectuada. Además, de conocer algunos criterios de importancia en el tema de la radiografía industrial como ensayo no destructivo en probetas de acero soldadas.

PRESENTACIÓN

En la radiografía industrial utilizada como ensayo no destructivo se hace necesario la obtención de imágenes radiográficas que cumplan con los parámetros de calidad presentes en las normativas internacionales. Los parámetros de calidad permiten que una imagen radiográfica sea evaluable o no. Es justo en esta instancia donde una imagen radiográfica se convierte en evaluable cuando cumple con un valor de penumbra geométrica mencionado en el código ASME V 2010, artículo 2 – T-274. La penumbra geométrica en radiografía industrial es la falta de nitidez que se tiene en los bordes de una zona con otra, por ejemplo, en una soldadura se tiene la delimitación del cordón de soldadura con el material base. Es en la frontera de estos que se tienen diferentes contrastes, pero también se puede tener falta de nitidez, así como distorsiones debido a que la penumbra geométrica tiene magnitudes mayores que las aceptadas en las normativas.

En el presente trabajo se darán a conocer definiciones netamente propias de la radiografía industrial ya que son éstas las que permitirán conocer un poco más sobre la importancia que se tiene en el estudio de la calidad de imágenes por medio de la determinación del tamaño focal de un equipo de rayos X. Para el presente caso el equipo utilizado será el del Laboratorio de Ensayos No Destructivos de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la EPN. Como es conocido, el equipo de radiografía industrial del laboratorio es antiguo. Data de los años de 1964, según el manual de instrucciones y mantenimiento del equipo. Por la razón de antigüedad del equipo se tienen variaciones en el tamaño de foco tomando en cuenta el valor teórico con el real, dando errores que demandan ser estudiados.

Con el presente trabajo se busca lograr el mejoramiento de los cálculos radiográficos y sobre todo garantizar que las imágenes obtenidas hasta ahora evaluadas tengan el respaldo teórico y científico de una inspección no destructiva con radiografía industrial de calidad. Cabe resaltar que, sin un valor conocido del tamaño del foco real no se puede obtener un valor real de la penumbra

geométrica. Es por esto que se puede cometer errores en el dimensionamiento de defectos de soldaduras, ya que primero, se debe realizar el cálculo de la penumbra geométrica que tiene como parámetro fundamental el tamaño del foco del equipo. Es importante acotar que, el tamaño del foco también se especifica en el manual original de instrucciones y mantenimiento del equipo pero que es un valor de fábrica y que por cuestiones de los años de uso y del desgaste propio del mismo, este valor de foco cambie generando errores que se estudiarán también.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La importancia de estudiar el tamaño de foco de un equipo de rayos X proviene de la necesidad de conocer realmente qué distorsión de imagen se está teniendo en las radiografías que se realizan en un laboratorio que trabaja con radiaciones ionizantes como método de ensayo no destructivo, para este caso particular, es el de Ensayos No Destructivos.

Para poder desarrollar el estudio es necesario conocer el método llamado imagen de agujero de alfiler "pinhole imaging", que permite conocer mediante un ensayo normalizado, cuanto mide el tamaño de foco experimental o actual del equipo de rayos X. Para realizar la determinación del tamaño de foco es indispensable conocer los conceptos básicos que rigen los rayos X, ya que este conocimiento permitirá entender sobre el método a tratarse.

El método consiste a breves rasgos en perforar pasante una placa de plomo como material con un diámetro muy pequeño; es por esto el nombre que lleva; el denominado agujero de alfiler. Por el mencionado orificio se inciden los rayos X por el cual estos pasarán denotando geometrías ya conocidas que serán explicadas más adelante. La imagen del foco del equipo se imprime en una película radiográfica que se coloca a una distancia que ya está normalizada, pudiéndose así conocer cuál es el tamaño real del equipo luego de una medición posterior en un software de análisis de imágenes que está sugerido por la designación E1165 - 12 de la ASTM. El software lleva como nombre: "ISee!" The BAM radiographic image analysis software. Lo que se realiza en el software es la medición tanto del ancho como del largo del foco del equipo.

Se plantea realizar diferentes tomas para poder obtener un valor que represente de manera real y acertada el tamaño del foco del equipo. Se contará con un set de probetas con perforaciones de diferentes diámetros los cuales van desde 0,1 mm hasta 0,4 mm y con espesores de diferentes dimensiones.

Posteriormente, se recogen los datos de las medidas de foco obtenidas para ser analizadas en otro software esta vez de estadística para que se tenga un valor promedio del tamaño de foco que represente a la toma de datos realizada en el laboratorio. El software a utilizar es "Statgraphics Centurion 16". El análisis se realizará con una distribución "t de student" ya que se tienen pocos datos. Por ejemplo, para una probeta de plomo con espesor de 1,3 mm y con un orificio de 0,4 mm se tienen 10 tomas por lo cual el análisis se realiza bajo esta modalidad. Y lo mismo ocurre para las demás probetas que a la final suman un total de 7 placas, dando como resultado 70 datos que serán procesados de 10 en 10.

Cuando ya se tengan los datos del tamaño de foco, lo que se realizarán es la determinación de la penumbra geométrica con el empleo de probetas de acero soldadas para comprobar cuál ha sido el aporte de encontrar el tamaño real del equipo. Esto se logra mediante la determinación del error encontrado tomando en cuenta el tamaño de foco teórico y con el tamaño de foco real que es el obtenido. El tamaño de foco teórico es el que viene en el manual del equipo y el real es el que se obtiene de la experimentación. Lo que se espera es obtener un aporte considerable, ya que se tendrá error que será cuantificado para tener el valor en tablas y realizar su posterior análisis y discusión.

El presente trabajo es un aporte de investigación que toma en cuenta los criterios de la radiografía industrial como técnica no destructiva y los aplica mediante un método normalizado para la obtención del valor de tamaño de foco de un equipo de rayos X. Este a su vez se empleará en la determinación de la penumbra geométrica que se tiene en una imagen radiográfica que haya sido obtenida de una probeta de acero soldada. Es necesario tener en cuenta que, con un valor de penumbra geométrica sin un análisis y estudio previo, es muy posible la obtención de mediciones que no reflejen la medida real que se debe evaluar. Es también por este motivo que se deben tomar en cuenta los valores aceptados en normas en cuando a la penumbra geométrica. Por ejemplo, para una probeta con espesor hasta los 50 mm según la API 1104, sección T-274.2 el valor máximo de penumbra geométrica que se permite es de 0,51 mm. Todos los cálculos propios del presente estudio serán descritos a detalle más adelante, en los capítulos 3 y 4.

1.1 RAYOS X

Los rayos X son una forma de radiación electromagnética como la luz. Su característica principal es su longitud de onda extremadamente corta, que posee un valor de alrededor de una diezmilésima parte de lo que tiene la luz, o incluso menor. Es por esta característica que los rayos X tienen la capacidad de penetrar la materia y materiales que absorben o reflejan la luz ordinaria (Kodak, 1980). En la figura 1.1 se puede observar una porción del espectro electromagnético donde se tienen diferentes formas de radiación electromagnética como son los rayos X, rayos gamma, luz visible, luz ultravioleta y los rayos infrarrojos.

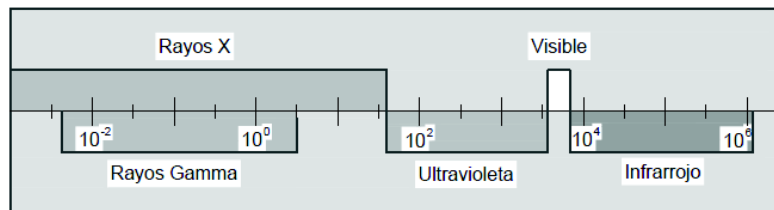


Figura 1. 1. Porción del espectro electromagnético. Longitudes de onda en Angstroms (GE Inspection Technologies, 2007)

1.1.1 TUBO DE RAYOS X

Un tubo de rayos X consta de una cubierta cerámica que contiene un electrodo positivo que es el ánodo y un electrodo negativo que es el cátodo. El tubo de rayos X es realizado a un vacío ultra alto que llega a los 10^{-9} hecto-Pascales. El cátodo consiste de un filamento que genera electrones. En la figura 1.2 se puede apreciar una ampolla de rayos X, donde se producen los rayos X.



Figura 1. 2. Ejemplos de tubos de rayos catódicos. A la izquierda una fotografía cortesía de (GE Inspection Technologies, 2007), a la derecha una fotografía cortesía de (Hellier, 1976)

Debido al alto voltaje establecido entre el ánodo y el cátodo los electrones son atraídos desde el cátodo hacia el ánodo, lo cual acelera su velocidad. Cuando los electrones acelerados chocan contra el objetivo en el ánodo, parte de su energía se convierte en radiación X, lo que se conoce como rayos X (GE Inspection Technologies, 2007). Un esquema elemental del proceso de obtención de los rayos X se puede observar en la figura 1.3.

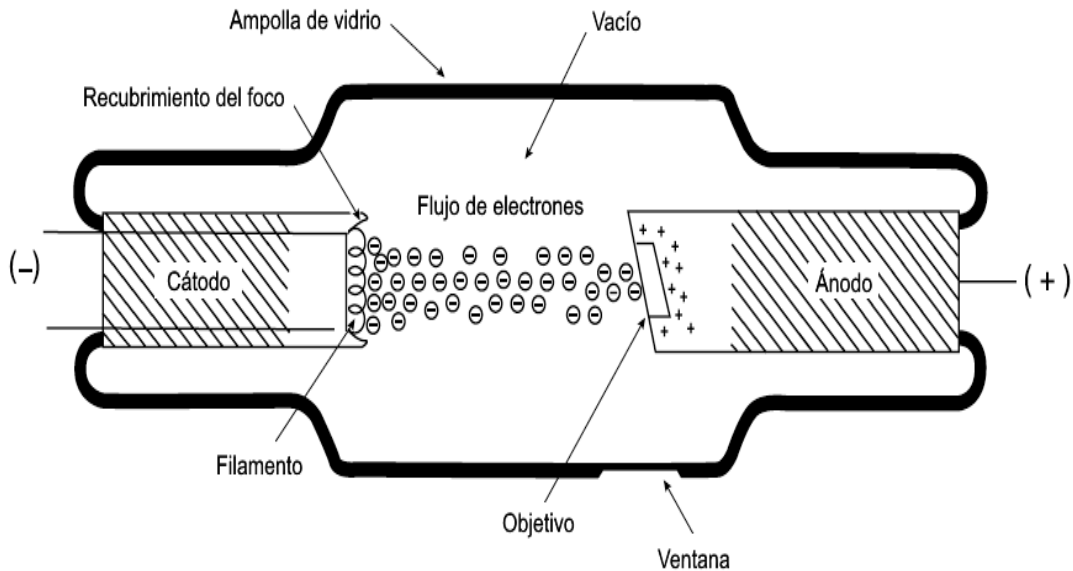


Figura 1. 3. Esquema de la producción de rayos X (Hellier, 1976)

1.1.2 EL ÁNODO

El objetivo es generalmente de tungsteno. Esto no sólo se debe a que tiene un alto número atómico, sino también debido a su alto punto de fusión, de aproximadamente 3400 grados centígrados. Es esencial utilizar un material con un alto punto de fusión, debido a la gran cantidad de calor disipado en el "bombardeo" de electrones ya que este se concentra en una superficie muy pequeña. Sólo una pequeña parte de la energía cinética de los electrones se convierte en radiación X; el resto se transforma en calor (GE Inspection Technologies, 2007).

1.1.2.1 Enfriamiento del ánodo

El calor que acompaña a la producción de radiación X es bastante considerable, de modo que el ánodo tiene que ser enfriado. Esto se puede efectuar de algunas maneras, como son: por radiación natural, por convección, por circulación forzada de líquido o de gas y por conducción (GE Inspection Technologies, 2007).

1.2 TAMAÑO DE FOCO

El estudio de los parámetros de calidad de imagen radiográfica es importante en el campo de la radiografía industrial, tal es el caso del conocimiento de las variables que influyen en una toma radiográfica para poder corregirlas si se da el caso. Por ejemplo, existen definiciones como el tamaño de foco o de la penumbra geométrica que se deben conocer para poder entender el desarrollo del presente trabajo.

En esta parte se hace necesario la explicación de algunos parámetros que influyen en este criterio. Para conocerlos de mejor manera se deben estudiar las variables que influyen en la obtención del tamaño del foco. Se plantea hacer una descripción muy breve de estas definiciones, ya que se desea que la revisión teórica sea corta para dar mucho más detalle a los capítulos pertinentes a la determinación del tamaño de foco y al de penumbra geométrica.

1.2.1 PUNTO FOCAL (FOCAL SPOT)

Es el área donde los electrones impactan, también se lo denomina solamente "foco". Es esencial que esta área sea lo suficientemente grande para evitar el sobrecalentamiento local, que podría dañar el ánodo (GE Inspection Technologies, 2007). Esta parte importante, se localiza justamente en el ánodo del equipo de rayos X. Como se ha comentado es aquí donde los electrones son bombardeados produciendo una gran cantidad de calor.

En la figura 1.4 se puede observar mediante numeración las partes que se consideran en lo concerniente al punto focal, tamaño efectivo del punto focal, tamaño de foco real, así como, la dimensión del haz de electrones y el extremo del ánodo.

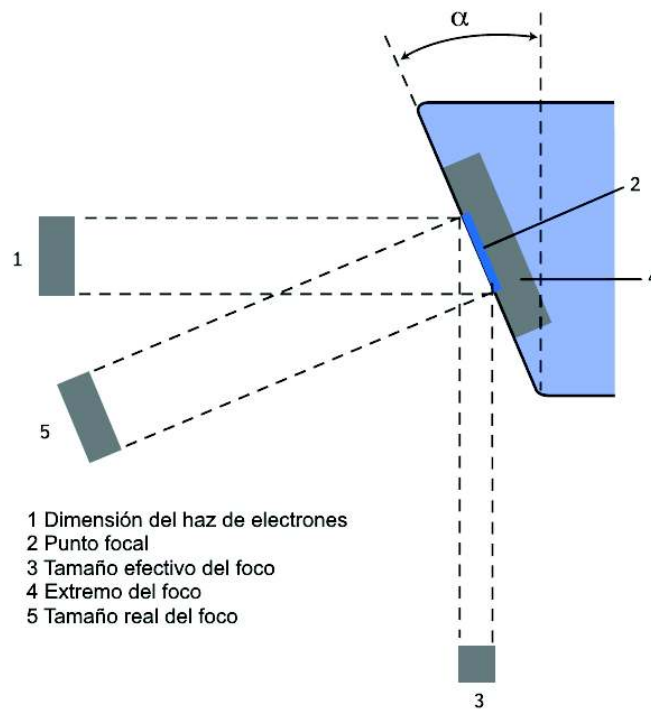


Figura 1. 4. Tamaño efectivo del punto focal (GE Inspection Technologies, 2007)

Como se puede ver, el tamaño del foco que se busca es el llamado punto focal, ahora bien, el nombre de punto focal se debe a que de forma teórica si se tiene un punto que incide rayos X en una película la distorsión es mínima y la imagen saldrá totalmente nítida. De la misma gráfica se puede comentar los demás parámetros que intervienen en el tamaño del foco. Estos se definen a continuación.

1.2.2 TAMAÑO DE FOCO REAL O PUNTO FOCAL ACTUAL

Como se observa en la figura 1.4, este es un punto en el que se tiene un tamaño real del foco, es decir, es una proyección perpendicular del punto focal. Cabe indicar que esta magnitud no se obtiene con el procedimiento sugerido en las normativas, pero que es necesario conocerlo geoméricamente.

1.2.3 TAMAÑO EFECTIVO DEL PUNTO FOCAL

A breves rasgos es lo que se busca mediante la experimentación. Ahora bien, este principio se utiliza cuando se tiene un punto focal de pequeño tamaño efectivo, pese a que la zona focal real en la cara del ánodo puede ser muy grande, como se ilustra en la figura 1.5. Al hacer que el ángulo entre la cara del ánodo y el rayo central sea pequeño, por lo general de 20 grados, el área efectiva del punto es una fracción de su área real. Con el área focal en la forma de un rectángulo largo, el área proyectada en la dirección del rayo central es cuadrada (Kodak, 1980).

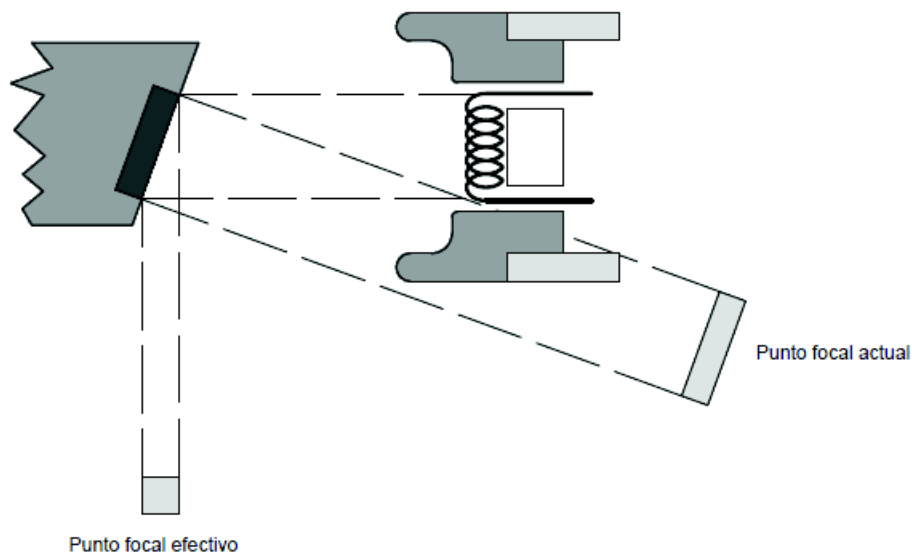


Figura 1. 5. Representación de la relación entre el área real del punto focal (área del bombardeo) y punto focal efectivo, considerando una inclinación de 20° (Kodak, 1980)

1.3 PENUMBRA GEOMÉTRICA

La penumbra geométrica se refiere a la pérdida de definición que es el resultado de factores geométricos del equipo radiográfico y a su configuración (NDT Resource Center, 2001-2014).

La penumbra geométrica es la manera con la que se puede cuantificar si una discontinuidad está dentro de los parámetros permitidos en el código ASME V 2010. De acuerdo a este código, es posible tener rangos aceptados de penumbra

geométrica. Por ejemplo, si se tiene una medida de penumbra fuera de los parámetros aceptados, este valor medido será el indicador que determine tener errores de medición. Los detalles de la penumbra geométrica se explicarán más adelante en el capítulo 4.

En la figura 1.6, se puede observar algunos de los elementos que están presentes en la realización de una toma radiográfica común.

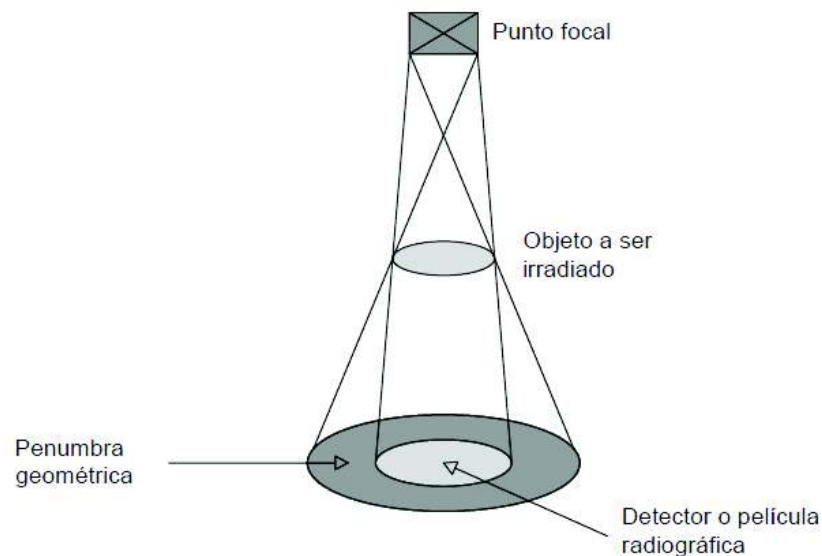


Figura 1. 6. Representación de la penumbra geométrica y elementos

Fuente: Propia

1.3.1 PRINCIPIOS GEOMÉTRICOS EN LA FORMACIÓN DE IMAGEN

Algunos principios geométricos de formación de imagen para obtener imágenes nítidas y próximas a las formas y tamaño del objeto son los siguientes: (a) que el foco emisor sea un punto o que sea lo más pequeño posible (comparar A y C de la figura 1.7), (b) que el foco emisor esté lo más alejado posible del objeto (comparar B y C de la figura 1.7), (c) que el detector o película radiográfica (o film) este lo más cercana posible al objeto (comparar B y D de la figura 1.7), (d) los rayos emitidos deben ser perpendiculares al detector o a la película radiográfica (ver A y E de la figura 1.7) y (e) el plano del objeto y el de la película radiográfica deben ser paralelos (comparar A y F de la figura 1.7). (Kodak, 1980).

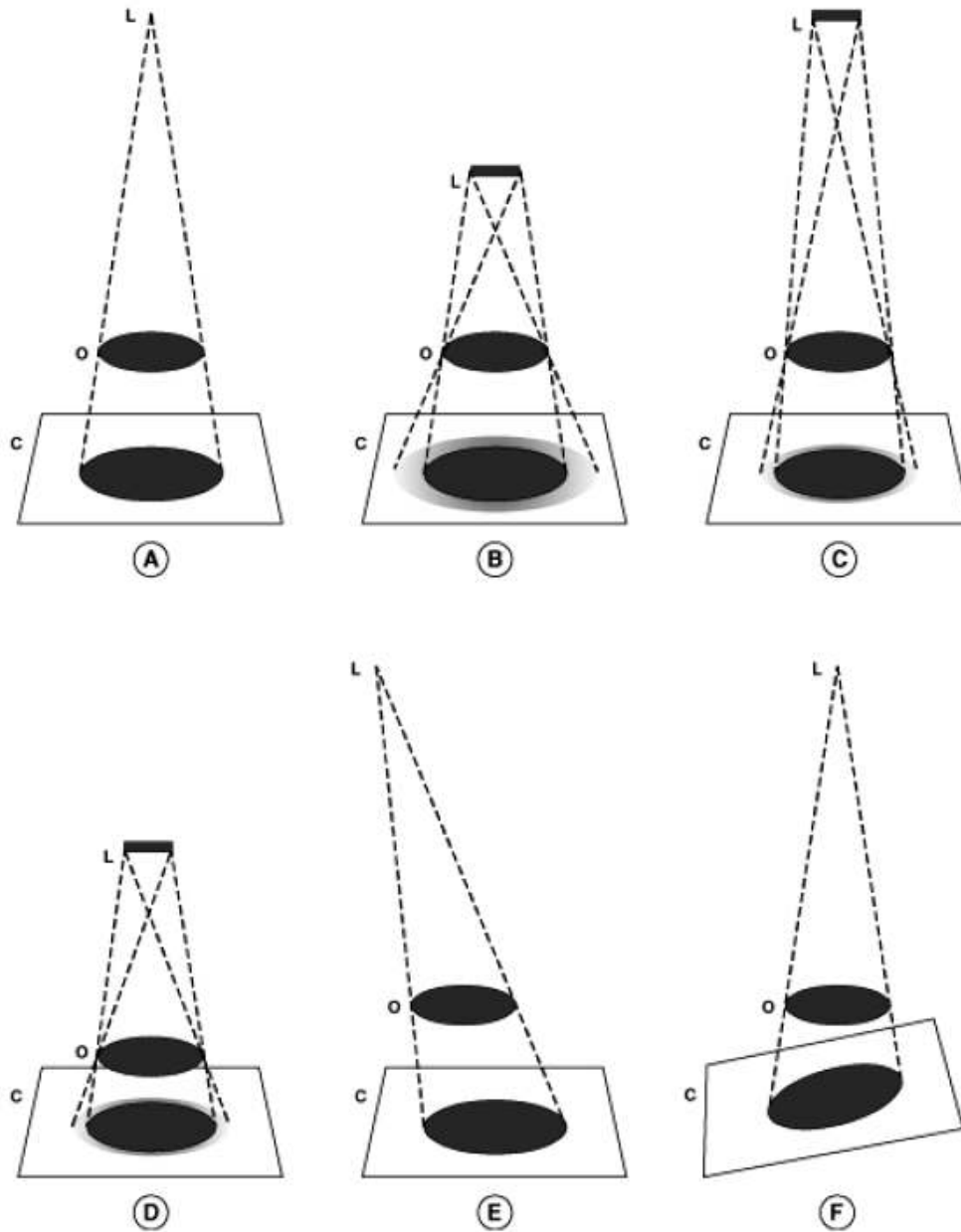


Figura 1. 7. Ilustraciones de los principios geométricos de formación de imagen (Kodak, 1980)

1.3.2 MÉTODO “PINHOLE IMAGING” DE AGUJERO DE ALFILER

Aplicando los principios de radiografía industrial y mediante un método normalizado se puede obtener el tamaño del punto focal de un tubo de rayos X. El método tiene como nombre, método de agujero de alfiler “pinole imaging” que se basa en incidir radiación X a través de una placa de plomo de espesor definido y que tenga un orificio de diámetro relativamente pequeño (pinhole) en el centro

de esta. La placa de plomo se ubica a mitad de camino entre el punto focal o foco emisor de rayos X y el detector o película radiográfica. Al aplicar este método se deben cumplir los principios geométricos de formación de imagen radiográfica. En la figura 1.8 se muestran los elementos y parámetros que se utilizan en el ensayo por el método de agujero de alfiler.

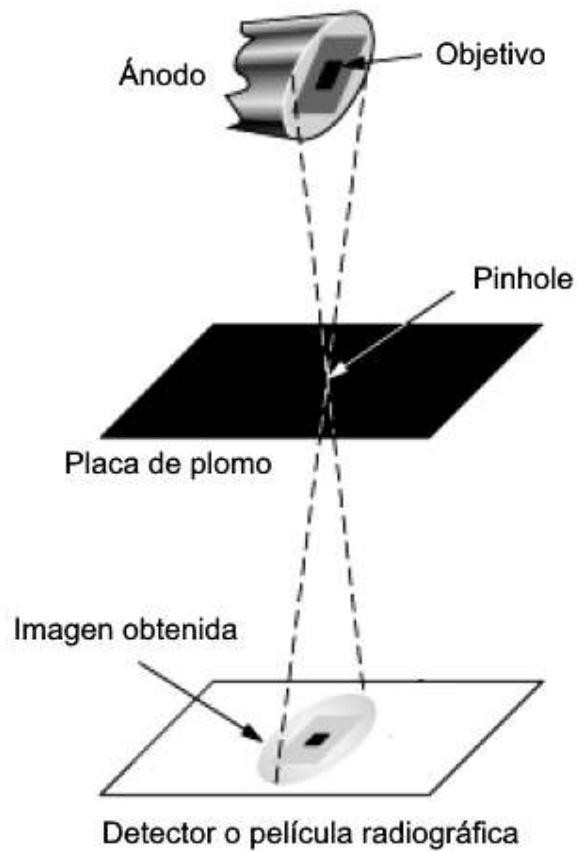


Figura 1. 8. Esquema de realización del método de agujero de alfiler (pinhole) (Kodak, 1980)

Luego de aplicado el ensayo y posterior a que la película radiográfica sea revelada, está habrá registrado el punto focal exactamente en tamaño y forma física del equipo de rayos X. Si se da una corta exposición de la película radiográfica se registrará una imagen que mostrará la forma y las dimensiones del foco, pero si se da una exposición prolongada, entonces se tendrá los detalles del ánodo de cobre del sistema, así como del objetivo de tungsteno donde impactan los electrones.

En la figura 1.9 se pueden apreciar las dos situaciones donde se tiene corta exposición y también donde se tiene una larga exposición a los rayos X.

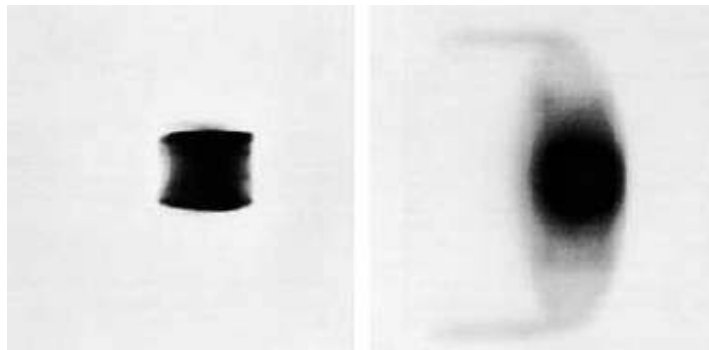


Figura 1. 9. Imagen del punto focal. Corta exposición (izquierda) y exposición prolongada (derecha) (Kodak, 1980)

1.4 NORMAS DE REFERENCIA

Para la determinación del tamaño de foco de equipos de rayos X, se tienen dos normas internacionales importantes que se deben considerar, la primera es la ASTM E1165 – 12 y la segunda es la EN 12543-5. La ASTM E1165 - 12 comprende las instrucciones para determinar el tamaño efectivo de los puntos focales estándar y mini-focos de tubos de rayos X industriales (ASTM E1165 - 12, 2012). La Norma Británica EN 12543-5 o llamada también norma europea especifica el método para la medición de puntos focales de dimensiones entre 5 micras y 300 micras en equipos de rayos X que operen hasta los 225 Kv (BS EN 12543-5, 1999).

Es importante notar que las normas mencionadas hacen referencia a otras designaciones que tratan de temas puntuales relacionados a detalles propios del ensayo a realizar. Es necesario ir las desarrollando a cada una de ellas para poder tener variantes en la obtención del tamaño de foco. Además, de poder dar a conocer datos y procedimientos de trabajos relacionados en el área.

El código ASME V 2010, es también importante para observar datos de la penumbra geométrica que son permitidos. Estos valores se encuentran en el artículo 2 – T-274 (ASME V, 2010).

La designación E1165 – 12 sugiere que la imagen del punto focal obtenida se debe medir tanto en su dimensión horizontal como en su medida vertical. En la figura 1.10 se puede observar una imagen obtenida de un equipo generador de rayos X y las medidas dimensionales de esta.

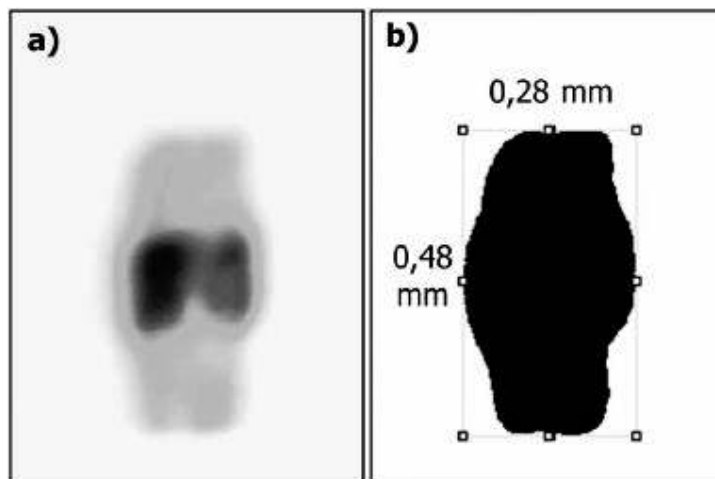


Figura 1. 10. Medición de la imagen del punto focal. Ejemplo de imagen sin mediciones (Izquierda) y Ejemplo de la imagen con mediciones (derecha) (ASTM E1165 - 12, 2012)

1.5 EVALUACIÓN DE RADIOGRAFÍAS

Para realizar una evaluación de calidad de imágenes radiográficas que cumpla con todos los criterios, se debe tener un orden secuencial de cumplimiento de todos los parámetros de calidad que se presentan a continuación.

1.5.1 PENUMBRA GEOMÉTRICA

Para obtener valores adecuados de penumbra geométrica, es sumamente necesario el manejar las distancias idóneas de acuerdo al material a ensayar. Como se pudo ver en la figura 1.6, se tienen dos distancias fundamentales que son las que van desde la fuente emisora hacia el objeto a radiografiar y la distancia desde el objeto hacia la película o detector. Si los valores de penumbra geométrica son los idóneos se procede a realizar la toma radiográfica, con las distancias preestablecidas.

1.5.2 INDICADORES DE CALIDAD

Los indicadores de calidad son dispositivos que permiten saber si una imagen radiográfica posee una buena definición y poder ser evaluada. Por ejemplo, con indicadores de hilos, según el espesor que tenga una probeta radiografiada, se tiene un número mínimo de hilos que se deben visualizar. El concepto de indicadores de calidad no es objeto del presente estudio.

1.5.3 DENSIDAD DE IMAGEN RADIOGRÁFICA

Sin duda es uno de los parámetros más importantes, ya que mediante la densidad de imagen radiográfica se puede visualizar las discontinuidades. El valor de densidad de imagen es un parámetro fundamental en la visualización de defectos, y es justo que con valores de densidad adecuados se pueden observar los contrastes entre una y otra zona.

1.5.3.1 Características de una imagen radiográfica

Una imagen radiográfica debe tener cierta definición, densidad y contraste para poder ser evaluada sin problemas y también sin cometer errores en la medición. Por todo esto es necesario conocer que para que una imagen pueda ser evaluable, es necesario que esta tenga un rango de densidad radiográfica que este normado.

Para poder conocer de mejor manera algunos parámetros importantes es necesario conocer dos definiciones muy importantes, las cuales son: densidad y contraste.

Densidad

La densidad se define como el logaritmo en base 10 de la relación de la luz incidente y la luz transmitida a través de la película. El instrumento utilizado para medir la densidad se denomina densitómetro. En radiografía industrial el rango de densidad empleado es de 0 a 4 (GE Inspection Technologies, 2007). Este

rango de valores es el que se puede encontrar generalmente pero que no es el que se utiliza comunmente ya que es posible evaluar radiografías que tengan zonas de densidad mayor a 4 pero que no influyen en gran manera en la emisión de un criterio de evaluación radiográfica.

Contraste

El contraste de una imagen se define como el brillo relativo entre una imagen y el fondo adyacente de esta (GE Inspection Technologies, 2007).

1.5.3.2 Valores adecuados de densidad radiográfica

La mayoría de los códigos internacionales sugieren densidades entre 2,0 y 3,0 en el área correspondiente de la imagen. (GE Inspection Technologies, 2007). En la tabla 1.1 se muestra la pérdida de contraste en una película típica utilizada en referencia con valores de densidad (D) de 3,0 y por debajo de este.

Tabla 1. 1. Valores de densidad y contraste de una película típica radiográfica (GE Inspection Technologies, 2007)

Densidad D de una película radiográfica con 3.0 como máximo	Contraste de la película [%]
3,0	100
2,5	85
2,0	71
1,5	54
1,0	35

1.6 ESTADO DEL ARTE

Actualmente se tienen trabajos realizados en el área de radiografía industrial, donde se enfocan propiamente a determinar el tamaño de foco de equipos de rayos X. Otros de ellos a presentar nuevos métodos en los cuales enfocarse para poder determinar el tamaño de foco y la forma que tiene este. Además, trabajos de los efectos geométricos en la imagen, así como de trabajos que toman en cuenta principalmente lo referente a la identificación de discontinuidades con el uso de rayos X.

Es necesario especificar que los trabajos actuales aportan con información nueva y fresca para poder tener un punto de partida en el presente trabajo. También se puede comentar que los trabajos previos y que han sido desarrollados anteriormente son referentes que dan puntos a favor para reforzar mucho a los trabajos más actuales.

Como alcance, cabe indicar que el presente trabajo planea dar una solución práctica a la determinación del tamaño de foco, donde se tienen tomas radiográficas experimentales en el equipo de rayos X del laboratorio de Ensayos No Destructivos. Con esto se tendrán radiografías en las cuales se podrán medir los resultados y dar un valor del tamaño de foco del equipo de rayos X analizado. La solución experimental es la de utilizar los criterios que se especifican en normas, códigos, designaciones y los trabajos realizados en el área.

Un trabajo importante a considerarse es el presentado por Oliveira, A.D., et al., que lleva por nombre: "Determinación del tamaño del punto focal de un tubo de rayos X a partir del perfil del haz de radiación" (Oliveira, A. D., et al., 2015) que consiste en el estudio de la geometría que se tiene en la realización de una toma radiográfica para lograr obtener una fórmula que represente al modelo matemático seguido. Este trabajo presenta un modelo matemático muy completo y que se lo describe a continuación.

Para poder obtener el modelo matemático es importante revisar la geometría de realización de un ensayo por radiografía industrial. Para esto se toma en cuenta 3 consideraciones esenciales, que son: la apertura del agujero w por donde pasarán los rayos X, donde para el análisis realizado por Oliveira, et al. debe ser más grande que el punto focal c , también se consideran dos distancias b_1 y b_2 respectivamente que se encuentran en los lados derecho e izquierdo respecto al eje ZZ' además de las separaciones a_1 y a_2 . En este análisis también se plantea no solo obtener la relación del tamaño del punto focal sino también los tamaños del punto focal aparente c_L que puede ser obtenido con la penumbra del lado izquierdo p_L . El mismo análisis se efectúa para la obtención del tamaño del punto focal aparente del lado derecho.

En la figura 1.11 se puede observar la geometría utilizada en el análisis de Oliveira, et. al.

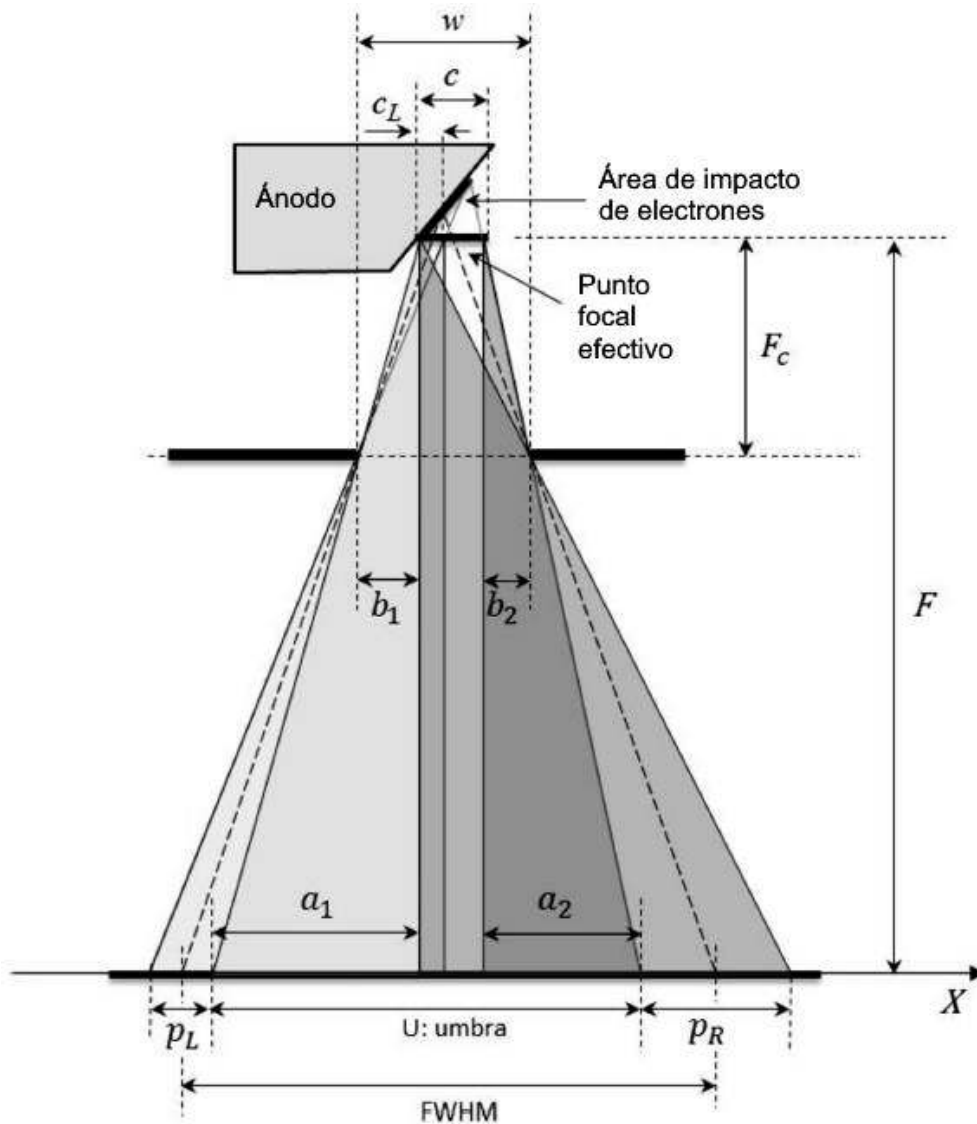


Figura 1. 11. Geometría utilizada para la obtención del tamaño del punto focal (Oliveira, A. D., et, al., 2015)

Ahora bien, planteado la relación comentada como una ecuación, se tiene:

$$b_1 + b_2 + c = w \quad \text{Ecuación (1)}$$

En el plano del detector se tiene un valor de Umbra U de:

$$a_1 + a_2 + c = U \quad \text{Ecuación (2)}$$

Haciendo semejanza de triángulos se tiene la siguiente relación:

$$b_2/F_c = a_2/F \quad \text{Ecuación (3)}$$

Para obtener el factor de magnificación que represente a la geometría de la figura 1.7, se tiene que el valor de M es.

$$M = F/F_c \quad \text{Ecuación (4)}$$

Donde F es la distancia desde el punto focal al detector y F_c es la distancia desde el objeto hacia el detector. Entonces de la ecuación (3) y (4) se tiene:

$$M = a_2/b_2 \quad \text{Ecuación (5)}$$

De esta relación se puede decir que el valor de a_2 es la magnificación de b_2 o lo que es lo mismo que la magnificación de a_2 es igual a Mb_2 . Una ecuación que se puede obtener con el desarrollo de esta relación es la ecuación (6).

$$a_1 + a_2 = M(b_1 + b_2) \quad \text{Ecuación (6)}$$

Reemplazando la ecuación (6) en la ecuación (2) se tiene:

$$M(b_1 + b_2) + c = U \quad \text{Ecuación (7)}$$

De la ecuación (1) se tiene:

$$(b_1 + b_2) = w - c \quad \text{Ecuación (8)}$$

Para finalizar, de las ecuaciones (7) y (8) el tamaño del punto focal se puede determinar con la ecuación (9).

$$c = (Mw - U)/(M - 1) \quad \text{Ecuación (9)}$$

La relación obtenida es válida si los valores del factor de magnificación M , la apertura del colimador o del orificio w y el valor de umbra U son conocidas. Entonces si esto ocurre, es posible encontrar el tamaño del punto focal.

Ahora considerando los lados tanto derecho como izquierdo de la penumbra se puede obtener mediante semejanza de triángulos la ecuación (10).

$$(c + b_2)/F_c = (c + a_2 + p_R)/F \quad \text{Ecuación (10)}$$

Resolviendo y desarrollado mediante la ecuación (9) se tiene:

$$c_R = p_R/(M - 1) \quad \text{Ecuación (11)}$$

Esta es otra expresión que se puede usar para estimar el tamaño del punto focal a partir de la penumbra generada en el lado derecho p_R y el factor de magnificación. El mismo argumento se puede usar para la penumbra en el lado izquierdo p_L .

Ahora, considerando la inclinación del ánodo el tamaño del punto focal aparente c_L se puede definir mediante semejanza de triángulos como:

$$(c_L + b_1)/F_c = (c_L + a_1 + p_L)/F \quad \text{Ecuación (12)}$$

Como se puede ver en la ecuación (12), esta viene a ser una variante a la expresión del tamaño del punto focal c .

$$c_L = p_L/(M - 1) \quad \text{Ecuación (13)}$$

Otro trabajo importante que precede al de Oliveira es el presentado por Doyum, A., et al., con título: "Un método práctico y conveniente para la medición de los puntos focales de tubos de rayos X industriales" (Doyum, A., et al., 1991), presentado en el año 1991, brinda un fundamento teórico muy bueno, dando una propuesta de la obtención del tamaño de foco de equipos de rayos X. Además, presenta datos y análisis estadísticos para ser utilizados.

El estudio presentado por Deng, Y.S. con título: “Estudio de la formación de imagen geométrica en radiografía” (Deng, 1989) consiste en estudiar los efectos geométricos que se tienen en la formación de imágenes. El trabajo lo hace de manera teórica y experimental. Además, se basa en la perspectiva geométrica y el uso de cálculos análogos en computadora y en gráficos.

El trabajo presentado por Ciorau, P. con título: “Comentarios críticos sobre el uso de rayos X e Ir-192 en la detección de discontinuidades lineales” (Ciorau, 1990) consiste en dar criterios fundamentados en la detección de discontinuidades presentes en los materiales. Como es el caso de la detección de fisuras, por ejemplo. En fisuras, se debe tener una buena definición de imagen ya que cualquier aberración de esta puede confundir la evaluación correcta de la fisura y confundirla con otra discontinuidad. Es por todo esto que en el trabajo mencionado se toman en cuenta conceptos de penumbra geométrica y de lo que concierne al tamaño de foco. Es importante notar que lo concerniente a lo que corresponde a rayos X es relevante para el trabajo aquí presentado.

Es importante en este punto comentar un poco más de los trabajos mencionados como aporte al aquí presentado. Con estos primeros trabajos se pretende observar los procedimientos que siguen los autores para realizar la determinación del tamaño de foco. Tal es el caso del trabajo de Oliveira, A.D., et al., donde mediante un modelo matemático da una solución usando la geometría que se tiene al realizar una toma radiográfica. Por otro lado, el trabajo presentado por Doyum, A., et al. Es una opción para usar un método práctico donde se toman en cuenta análisis estadísticos para reforzar el estudio. Cabe indicar que es un trabajo ya antiguo pero que si aporta en el sentido teórico algunos aspectos que pueden ser interesantes resaltar.

El trabajo presentado por Klaus Bavendiek et al., con nombre “Nuevos Métodos de medición del tamaño y forma del punto focal de tubos de rayos X en aplicaciones radiológicas digitales en comparación con normativas actuales” (Bavendiek, K., et.al., 2012) hace una revisión bastante interesante donde se hacen evaluaciones de miles de imágenes. Esta revisión consiste en la evaluación de imágenes que han sido realizadas tomando en cuenta diferentes

fuentes de radiación, energías, indicadores de calidad y con el uso de diferentes normas. Lo interesante del trabajo es que se enfoca en dar criterios análisis de las imágenes estudiadas tomando en cuenta el origen de estas.

El trabajo presentado por Salamon, M. et al. con nombre “Comparación de diferentes métodos para la determinación del tamaño del punto focal de micro-focos en tubos de rayos X” (Salamon, M., et al., 2008) describe el uso de algunos métodos para poder tener criterios de comparación en la obtención del tamaño de micro-focos en tubos de rayos X. Para comprender mejor este trabajo, se debe tomar en cuenta que para la determinación de micro-focos la norma que se emplea es la Norma Británica EN 12543-5.

El trabajo presentado por Madsen, J. con nombre “Mediciones del tamaño de punto focal para micro-focos de rayos X” (Madsen, 1989) es otro de los trabajos ya antiguos, presentado en el año de 1989, pero que maneja criterios importantes en lo concerniente a micro-focos. Lo que pretende además el trabajo es dar una literatura que sea entendida también por lectores que no son expertas en matemáticas o que involucren este tipo de análisis.

Aunque los aceleradores son de diferente naturaleza en cuanto a potencia generada y eficiencia en rayos X, el trabajo presentado por Gambaccini M., et al. con nombre “Medición del tamaño del punto focal en un acelerador lineal de 5,5 MeV” (Gambaccini, M., et al., 2011) aporta situaciones importantes en cuanto a la geometría que se maneja en la determinación del tamaño de foco tomando en cuenta equipos generadores de rayos X de gran energía. También, plantea un modelo matemático un poco más sencillo que el que plantea Oliveira, et. al., pero gran similitud.

Por último se tienen dos trabajos, el primero de ellos, el presentado por Sathe, D.B., et al. Et al. con nombre “Un método práctico para evaluar la falta de nitidez radiográfica” (Sathe, D.B., et al., 2007) y el segundo el presentado por Feaver, et al. con nombre “Medición de la calidad de la imagen radiográfica” (Feaver, 1968) que consisten en la utilización de indicadores de calidad para alcanzar el fin de la evaluación de falta de nitidez. Aunque estos dos últimos trabajos no se

relacionen directamente a la determinación del tamaño de foco, aportan con literatura interesante que puede ser considerada.

Como se puede ver, todos los trabajos mostrados, dan una idea de cómo se está actualmente en estudios relacionados en el tamaño de foco. También, es una forma adecuada de utilizar estos trabajos para poder hacer un aporte un poco más a detalle con el estudio implementado en el presente proyecto.

CAPÍTULO 2

MATERIALES Y EQUIPOS

Los materiales y equipos empleados son los comúnmente utilizados en las operaciones normales de un laboratorio que trabaja con radiaciones ionizantes. Adicionalmente, se tiene la presencia de materiales que son los necesarios para proceder a la obtención del tamaño de foco y la posterior determinación de la penumbra geométrica. Estos son descritos a continuación.

2.1 EQUIPO DE RAYOS X

El equipo de rayos X en el laboratorio data de los años 60's, según el manual del equipo (Ver ANEXO 1). Es de marca Balteau, modelo Baltographe BF 200/10. El país de procedencia es Bélgica, maneja un voltaje nominal de 200 kilo-voltios (Kv) y un amperaje de 10 mili-amperios (mA). Los detalles tanto del panel de control, del tubo de rayos X y del sistema de enfriamiento se presentan a continuación.

2.1.1 PANEL DE CONTROL

El panel de control o valija de control es donde se manejan y monitorean las variables de exposición radiográfica. En este se tienen, componentes importantes como son las perillas de control de kilo-voltaje y de mili-amperaje, que son variables de suma importancia a la hora de realizar tomas de radiografía industrial a probetas. Adicional, a las perillas se tienen dos escalas en las que se puede ver la medida de kilo-voltaje y mili-amperaje seleccionados mediante las perillas. Además, se cuenta con un cronómetro digital que asume el control de apagado del equipo. Este cronómetro posee dos bonotes tanto de encendido como de apagado donde se puede parar la operación del equipo desconectando todos los controles y por lo tanto el equipo deja de emitir radiación.

En la fotografía 2.1 se puede observar el panel de control del laboratorio de Ensayos No Destructivos (END).



Fotografía 2. 1. Panel o valija de control del laboratorio de END

Fuente: Propia

2.1.2 TUBO DE RAYOS CATÓDICOS

Como se puede observar en la fotografía 2.2 el tubo de rayos catódicos consta de una estructura para poder sostenerse perpendicularmente al piso. Es justo este elemento el que produce los rayos X que serán irradiados a los objetos deseados.



Fotografía 2. 2. Tubo de rayos catódicos del laboratorio de END

Fuente: Propia

En el manual del equipo se tienen datos importantes como son el voltaje y amperaje nominal con los que se puede trabajar. Estos datos son importantes

ya que permiten utilizar el equipo a los niveles permitidos para no desgastarlo demasiado. Los valores se presentan en la tabla 2.1 siguiente.

Tabla 2. 1. Características del tubo de rayos X (Ver Anexo 1)

Marca	Voltaje Nominal (kV)	Amperaje Nominal (mA)	Peso (kg)	Flujo de enfriamiento (lt/min)
Baltographe 200	200	10	13	0,57

2.2 CUARTO OSCURO

El cuarto oscuro es el lugar donde se puede efectuar el revelado de las placas radiográficas. Se lo hace mediante el uso de revelador y de fijador, con baños intermedios de agua entre el paso de la película del revelador al fijador y del fijador al baño de agua final. En la fotografía 2.3 se puede observar el cuarto oscuro del laboratorio de Ensayos No Destructivos.



Fotografía 2. 3. Cuarto oscuro del laboratorio de END

Fuente: Propia

2.3 PELÍCULA RADIOGRÁFICA

La película radiográfica es el elemento en el que se imprime la imagen radiográfica. Mediante esta se tendrá la imagen del foco del tubo del equipo de rayos X del laboratorio. La imagen obtenida en la película radiográfica se deberá medir para su posterior análisis.

En la fotografía 2.4 se puede observar una película radiográfica con su envoltura de protección con las denominadas pantallas intensificadoras de plomo, recubiertas por papel y selladas para evitar que se velen. En el lado derecho, se puede observar una película radiográfica revelada que contiene la información a evaluar.



Fotografía 2. 4. Película radiográfica (A la izquierda con su envoltura. A la derecha una película revelada en el cuarto oscuro)

Fuente: Propia

2.4 BROCAS

Las brocas empleadas para el ensayo, tienen diámetros de 0,1 mm, 0,2 mm, 0,3 mm, 0,4 mm. Estas brocas son de carburo de tungsteno y su longitud efectiva de perforación es mayor de acuerdo al incremento del diámetro nominal de las mismas. En la fotografía 2.5 se puede observar un set de brocas con las medidas mencionadas. Se cuenta con un total de dos brocas por cada diámetro considerado.



Fotografía 2. 5. Brocas de diámetros 0.1 mm, 0.2 mm, 0.3 mm y 0.4 mm (dos unidades c/u)

Fuente: Propia

Los datos de las brocas se pueden ver en la tabla 2.2.

Tabla 2. 2. Datos de las brocas a emplearse según el diámetro

MEDIDAS DE LAS BROCAS		
N°	Diámetro de agujero [mm]	Longitud para perforación [mm]
1	0,1	1,5
2	0,2	4,0
3	0,3	5,5
4	0,4	7,0

Conocer la longitud para perforación es importante ya que con esta medida se puede saber que espesor se podrá perforar y no tener problemas de que el agujero a efectuar sea pasante.

En la fotografía 2.6, se puede observar la broca de diámetro de 0,1 mm. Como se puede apreciar la parte que efectuará el agujero es muy pequeña por lo que toca tener mucho cuidado en su manipulación. Además, es importante el tener en cuenta el correcto montaje de la broca en la máquina denominada estación CAM de marca ROLAND MDX-40A que ayudará a realizar el agujero. La forma de colocar la broca en la máquina se la explicará más adelante.



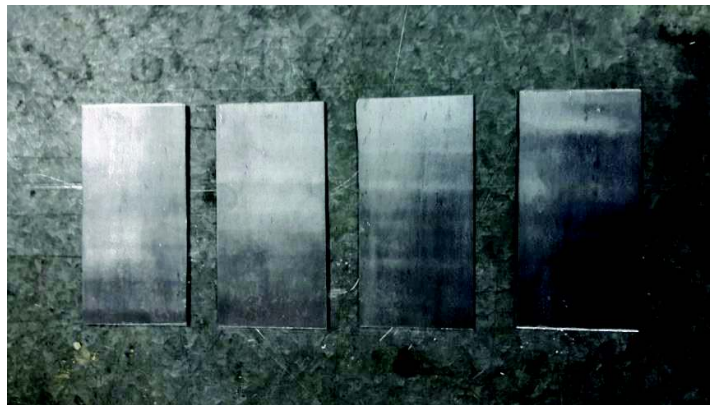
Fotografía 2. 6. Broca de 0,1 mm de diámetro

Fuente: Propia

2.5 PROBETAS DE PLOMO

El material principal donde se emitirá radiación es el plomo. Es justo por este material que los rayos X incidirán, pasando por el agujero realizado, permitiendo que se imprima la imagen del foco en la película radiográfica mediante el ensayo descrito en este trabajo y en la designación ASTM E1165 - 12.

En la fotografía 2.7 se puede observar 4 probetas de plomo en las que se ensayará los orificios "pinhole" (Ver ANEXO 2: Ensayo a virutas de plomo).



Fotografía 2. 7. Probetas de plomo de espesor 1,3 mm

Fuente: Propia

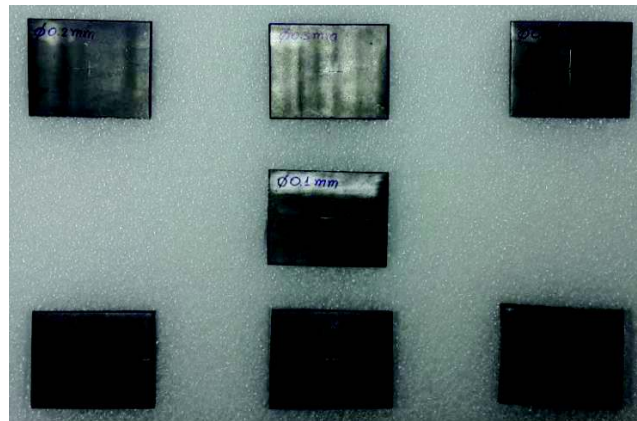
CAPÍTULO 3

DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE FOCO

En el presente capítulo se da a conocer el método empleado para la determinación del tamaño de foco del equipo de rayos X del laboratorio de Ensayos No Destructivos. Para esto se hace una revisión del proceso de obtención de las probetas que permitirán desarrollar el ensayo. También, se da a conocer algunos aspectos de importancia que recomienda la designación E 1165 para que el ensayo se efectúe de manera adecuada. Para los datos del tamaño de foco obtenidos, se realizará un análisis estadístico que dé el respaldo necesario de un valor verídico y confiable del tamaño de foco obtenido.

3.1 PROBETAS A ENSAYAR

El material con el que se realizan las probetas es plomo (ver ANEXO 2), donde se realiza un orificio con brocas de diferente diámetro. En la fotografía 3.1 se puede observar 7 probetas de plomo cada una con diferentes características en sus dimensiones.



Fotografía 3. 1. Set de probetas de plomo de diferentes medidas, tanto en diámetro de orificio como en espesor

Fuente: Propia

Las probetas como tal ya tienen su numeración definidas, las dimensiones de cada una de ellas se muestran en la tabla 3.1, donde por ejemplo la probeta 1 corresponde a las dimensiones en volumen de 50x40x1,3 mm y con un diámetro de agujero de alfiler de 0,1 mm. Como se puede apreciar, todas y cada una de las probetas difieren una de otras en sus espesores como en diámetros.

Desde la probeta 1 hasta la 4 se tiene el mismo espesor, pero diferente diámetro. Este juego de probetas permitirá realizar un análisis de la variación que existe en el tamaño de foco del equipo tomando en cuenta los diferentes diámetros que se tienen en las probetas. Esto se debe a que se tiene el mismo espesor y diámetros que van desde 0,1 mm hasta el 0,4 mm, pasando por 0,2 mm y 0,3 mm. En cambio, desde la probeta 5 hasta la probeta 7 se tienen diferentes diámetros y diferentes espesores. Para este juego de probetas la probeta 1 también es considerada. Como se puede observar en la tabla 3.1, la probeta 7, tiene un espesor de 6,8 mm con un diámetro de agujero de 0,4 mm. En la tabla 3.1 se puede observar un resumen de los datos de las probetas de plomo a ensayarse.

Tabla 3. 1. Dimensiones de las probetas a ensayar

N°	Dimensiones [mm]			Diámetro de agujero [mm]
	Largo	Ancho	Espesor	
1	50	40	1,3	0,1
2	50	40	1,3	0,2
3	50	40	1,3	0,3
4	50	40	1,3	0,4
5	50	40	3,3	0,2
6	50	40	3,9	0,3
7	50	40	6,8	0,4

Para este caso el espesor de las probetas interviene en el tiempo de exposición, ya que la radiación deberá traspasar una mayor cantidad de material. Es decir que mientras mayor cantidad de material se tenga mayor será la energía necesaria. Cabe comentar, que en un material homogéneo donde se inciden rayos X se tendrá una sola densidad radiográfica, pero si este mismo material tiene una cavidad o discontinuidad, esta discontinuidad se podrá observar en la película radiográfica debido a la diferencia de contrastes obtenida. Por ejemplo, la zona en la que existe la discontinuidad se tendrá mayor densidad radiográfica,

es decir, que esa zona se verá más oscura que las demás, como se puede ver en la figura 3.1.

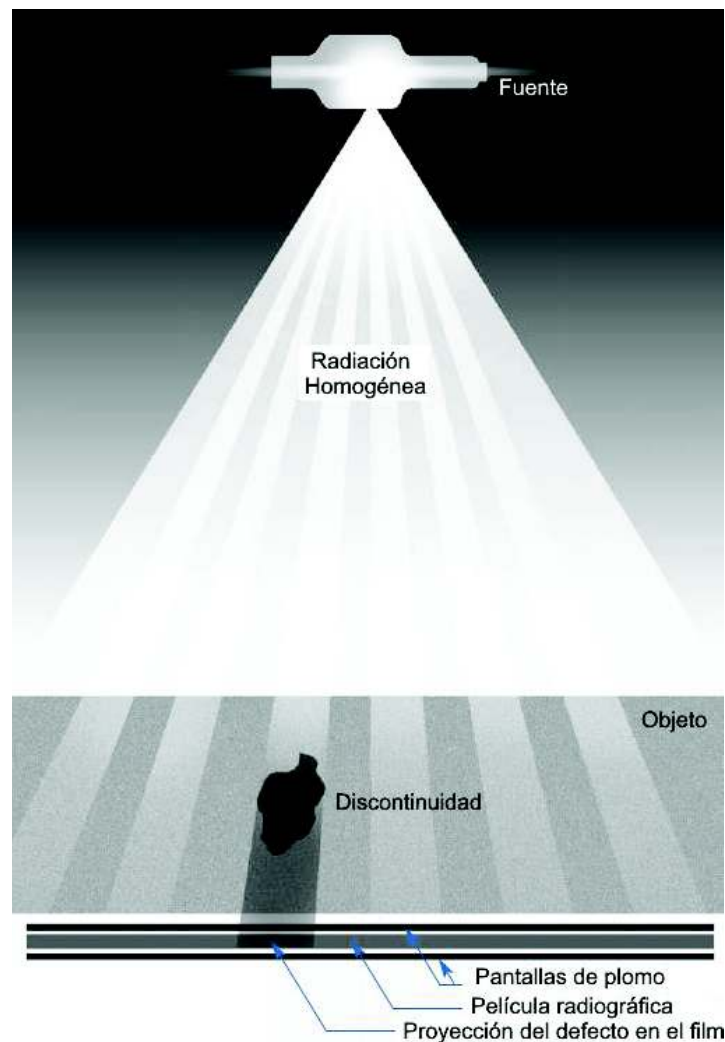


Figura 3. 1. Configuración de una toma radiográfica según su espesor (GE Inspection Technologies, 2007)

3.1.1 PROCESO DE OBTENCIÓN DE LAS PROBETAS

Para la obtención de las probetas fue necesario el realizar algunos procesos en el material. Para realizar las probetas del presente ensayo, se necesitó de la colaboración de 3 laboratorios adicionales al de Ensayos No Destructivos. El primero fue el laboratorio de Conformado mecánico, donde se realizaron procesos de fundir el material que originalmente se encontraba en lingotes, posteriormente se realizó un laminado y por último el corte a la medida deseada.

El segundo, el laboratorio LABINTECDIMP (Laboratorio de Investigación, Desarrollo e Innovación en Nuevas Tecnologías de Diseño, Manufactura y Producción), donde se realizaron los agujeros. Este laboratorio fue muy útil y necesario, ya que la precisión con la que se debía realizar los maquinados demandaban de acercamientos en centésimas de milímetros. Por último, el Departamento de Metalurgia Extractiva, donde se realizaron las comprobaciones del caso, es decir, si el material empleado efectivamente era plomo.

3.1.1.1 Proceso de conformado mecánico

Los procesos empleados en esta etapa son los de obtención de las probetas con los espesores que permitan las brocas. Primero que todo se fundió el lingote que se muestra en la fotografía 3.2.



Fotografía 3. 2. Lingote de plomo a ser fundido

Fuente: Propia

En la fotografía 3.3 se puede observar el proceso de laminado realizado para llegar a las dimensiones adecuadas.



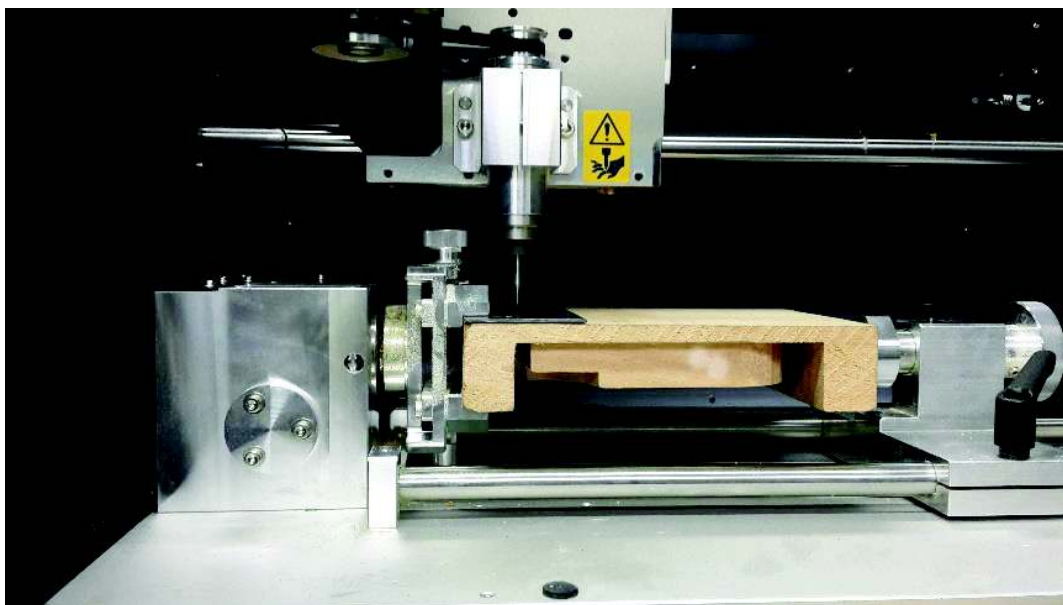
Fotografía 3. 3. Laminado

Fuente: Propia

3.1.1.2 Proceso de maquinado

El proceso de maquinado es muy importante para llegar a los resultados necesarios. Como se comentó, los agujeros se realizaron en el laboratorio LABINTECDIMP, en la estación CAM de marca ROLAND MDX-40A. La estación CAM es una máquina que tiene una velocidad de avance de la herramienta de 0,01 mm, por lo que es ideal para realizar los agujeros que se requieren en el método “pinhole imaging”.

En la fotografía 3.4 se puede observar la herramienta montada y la placa de plomo a ensayarse.



Fotografía 3. 4. Maquinado de orificio

Fuente: Propia

3.2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL DEL ENSAYO

El procedimiento llevado a cabo para la obtención del tamaño de foco, toma en cuenta algunos puntos importantes. Por ejemplo, aspectos como la ubicación de las probetas, o como la consideración del tiempo y del kilo-voltaje que son aspectos que son totalmente importantes a la hora de efectuar una toma de radiografía para la determinación del tamaño de foco.

3.2.1 DATOS IMPORTANTES A TOMAR EN CUENTA

El desarrollo del ensayo demanda del conocimiento de algunos valores de suma importancia para efectuar un ensayo de calidad. Con un ensayo efectuado correctamente se tendrán los valores esperados.

3.2.1.1 Factor de magnificación

El factor de magnificación es una relación que permite situar la probeta que tienen el orificio ensayado a cierta distancia del punto focal y también considerar la distancia desde la probeta con el orificio hacia el detector que para este caso es la película radiográfica. La figura 3.2 muestra un esquema sencillo del ensayo.

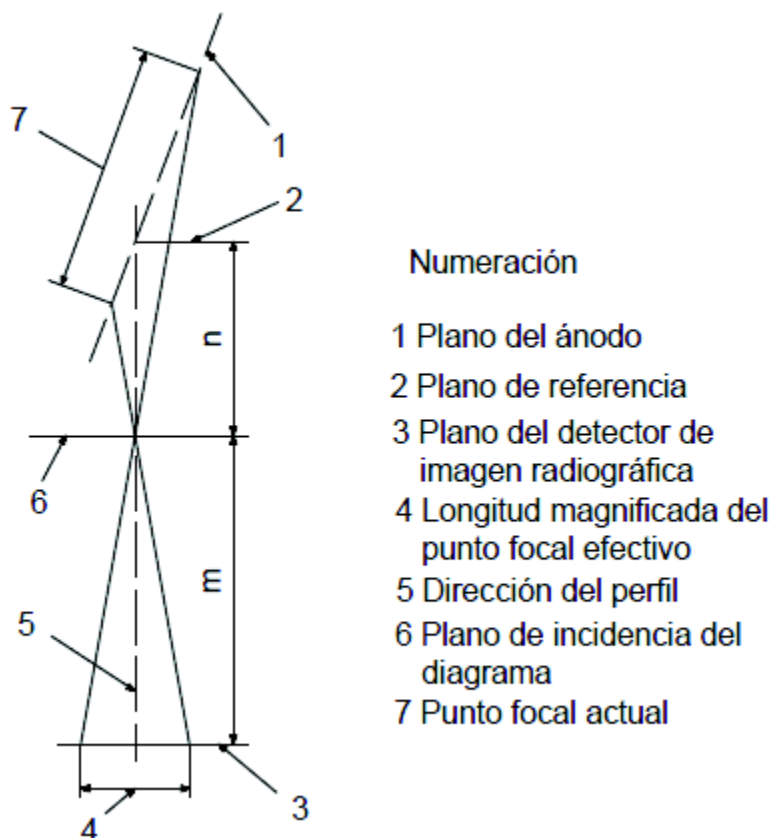


Figura 3. 2. Esquema de la realización del ensayo (ASTM E1165 - 12, 2012)

Como se puede ver en la figura 4.5 se tienen algunos parámetros que se enuncian en la misma gráfica. También se puede apreciar que existen las letras m y n las cuales representan y dan razón al factor de magnificación expresado.

Como se puede notar m representa la distancia que se tiene desde el punto focal del equipo de rayos X hasta la probeta de plomo que contiene el orificio. También se puede apreciar la distancia n que representa la distancia desde la probeta con el orificio hasta la película radiográfica que registrará el tamaño de foco.

En la tabla 3.2 se pueden ver los valores que la designación E1165 - 12 sugiere para desarrollar un ensayo correcto.

Tabla 3. 2. Factores de magnificación según la designación E1165 - 12

Tamaño del punto focal anticipado d [mm]	Magnificación mínima n/m	Distancia entre el punto focal y el "pinhole" [m]	Distancia entre el "pinhole" y el detector [n]
0,05 hasta 2,0	3:1	0,25	0,75
>2,0	1:1	0,50	0,50

Para mayor detalle se recomienda observar la tabla 2 de la designación E1165 - 12, ya que existen algunos aspectos necesarios a tomar en cuenta. En el presente caso se tiene el caso de factor de magnificación 1:1 ya que el tamaño focal según el manual del equipo (Ver ANEXO 1) es de 3,2x3,2 mm. Es por esto que se toma el segundo valor que corresponde a tamaño de puntos focales mayores a dos milímetros. En la figura 3.3 se puede observar una representación del factor de magnificación empleado.

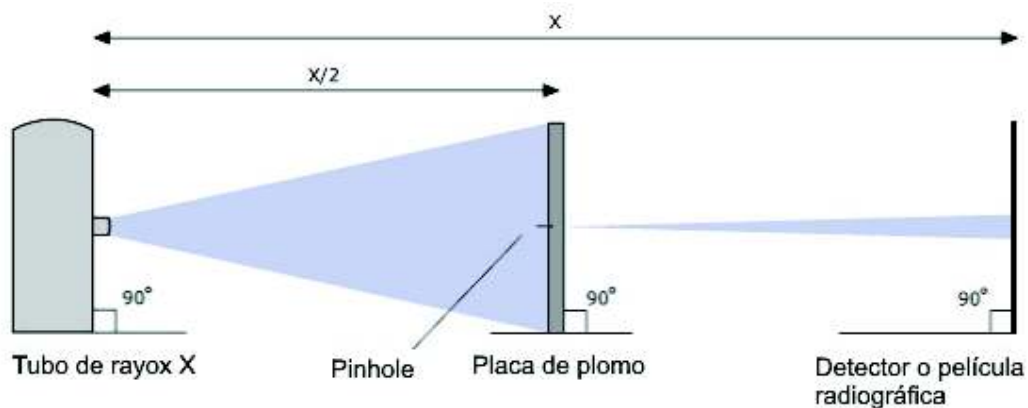
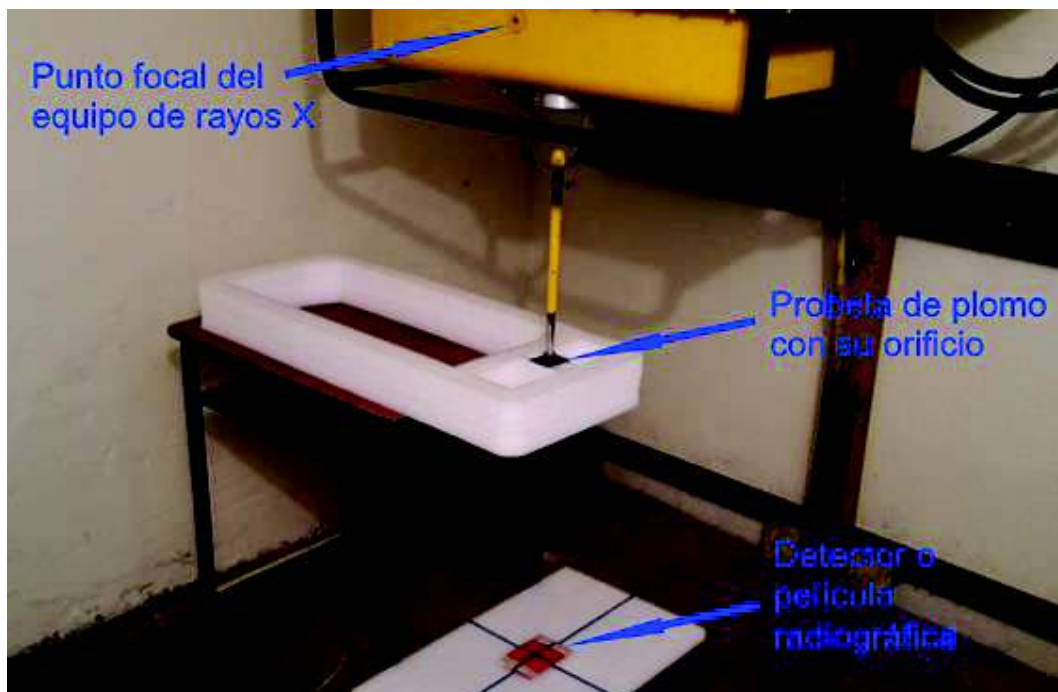


Figura 3. 3. Representación del factor de magnificación (NDT Resource Center, 2001-2014)

3.2.2 REALIZACIÓN DEL ENSAYO

El ensayo ya descrito es realizado mediante la geometría mostrada en la fotografía 4.5, la cual se basa en la figura 3.1 ya mencionada. Como se puede ver, se tienen los elementos necesarios como es el punto focal del equipo de rayos X, la probeta de plomo con su perforación “pinhole” y el detector que para este caso es una película radiográfica.

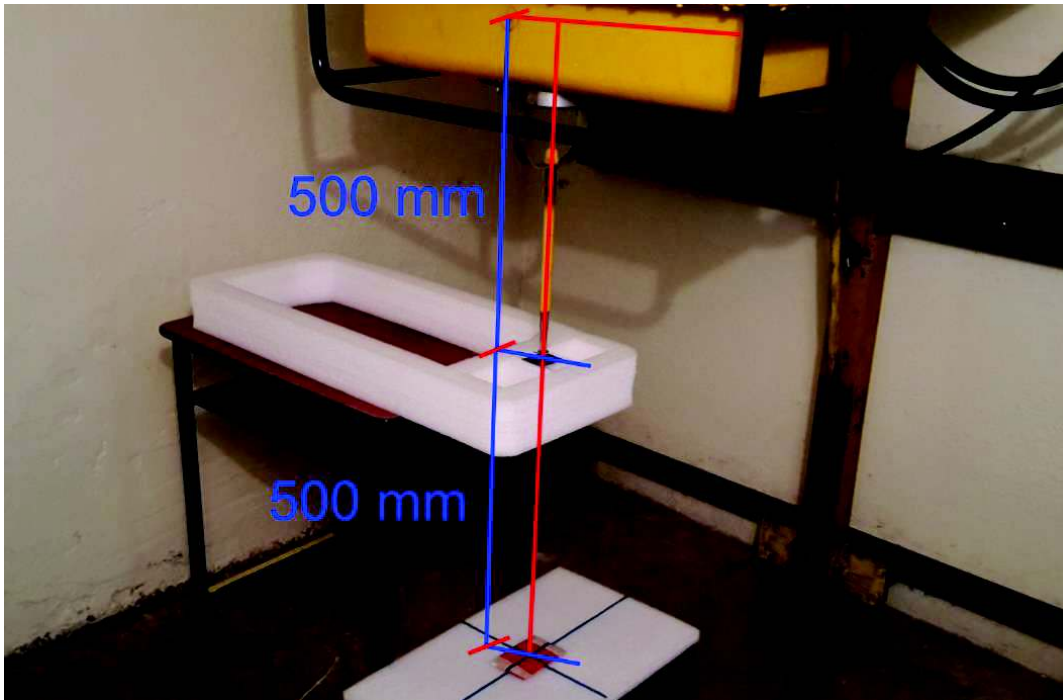


Fotografía 4. 5. Realización del ensayo en el laboratorio de END

Fuente: Propia

Como ya se ha comentado en el capítulo 1, con el presente ensayo se obtiene la dimensión correspondiente al tamaño efectivo de foco efectivo del equipo de rayos X del laboratorio. Es justamente el tamaño efectivo del foco el que da la dimensión real que se busca. Con la medida obtenida del tamaño de foco del ensayo se puede contrastar con el dato de foco que se tiene en el manual del equipo de rayos X (Ver ANEXO 1). Como ya se ha comentado el tamaño de foco según el manual es de 3.2x3.2 mm. Con los valores obtenidos del tamaño de foco se procede a obtener la penumbra geométrica y su posterior cálculo de error y contrastación de resultados que se analizará más adelante.

Las distancias m y n consideradas se pueden observar en la fotografía 4.6.



Fotografía 4. 6. Distancias m y n para el ensayo desarrollado

Fuente: Propia

3.2.3 RESUMEN DE LOS PASOS PARA REALIZAR EL ENSAYO

Para realizar la medición de tamaño efectivo del punto focal se siguen los siguientes pasos. El procedimiento es parte de la designación ASTM E1165 - 12.

- a. Ensayar un orificio en una placa de plomo de espesor suficiente para poder absorber la radiación y asegurar que pase por el pequeño orificio únicamente. El espesor no está especificado en la norma, pero se lo puede encontrar por medio de ensayos de prueba y error.
- b. Colocar la placa de plomo directamente perpendicular al haz de rayos X y exactamente a medio camino entre el blanco del tubo de rayos X y la película. Para entender mejor esta parte es necesario conocer del factor de magnificación que se tiene en equipos de rayos X de esta naturaleza.
- c. Centrar el agujero de alfiler con el haz de rayos X.

- d. Ajustar el kilo-voltaje (kV) del equipo a un 75% de su valor nominal. Este valor es recomendado en la norma ASTM E1165 - 12. El valor seleccionado para el equipo del laboratorio es de 150 Kv ya que el valor nominal que se maneja es de 200 Kv (Ver ANEXO 1).
- e. Ajustar el amperaje a un valor que multiplicado por el kilo-voltaje ya puesto no exceda el valor de potencia sugerido por el manual del equipo. Para el equipo del laboratorio, este valor es de 0,4 mA para que la potencia máxima de operación sea de 600 W (Ver ANEXO 3: (Balteau NDT)).
- f. Ajustar el tiempo de exposición. Este valor se obtiene mediante el cálculo radiográfico y se ajusta a 2 minutos de exposición para tener congruencia en todas y cada una de las tomas radiográficas. Si se tiene poco tiempo de exposición se tendrá una imagen muy tenue. Por otro lado, si se excede en el tiempo de exposición se tendrá una imagen muy oscurecida.
- g. Realizar la toma radiográfica.
- h. Medir el tamaño de foco que se ha obtenido por medio del ensayo.

Como se observa los pasos descritos son una manera de dar a conocer una forma simple de efectuar el ensayo a realizar. Es muy importante notar que el ensayo demanda de datos técnicos que son muy importantes como es el caso del factor de magnificación que se debe emplear, así como de la configuración con la que se realiza el ensayo. Es por todos estos motivos que se describe a continuación todos esos conceptos a tomar en cuenta.

3.3 RESULTADOS OBTENIDOS

Para los datos de tamaño de foco obtenidos se ha especificado dos grupos de datos como se describe a continuación. El primero de estos datos son los que se obtuvieron a partir de la fotografía tomada a la película radiográfica que contiene al tamaño de foco. Como se conoce una fotografía tiene una medida en pixeles que transformada a milímetros da una segunda medida que también se presenta. Los otros datos obtenidos son los correspondientes al tamaño de foco que se tomaron desde la fotografía en el tamaño adecuado. Para mayor detalle, se tiene una mejor explicación en los puntos correspondientes siguientes.

3.3.1 DATOS DE LAS FOTOGRAFÍAS TOMADAS

Para la obtención de los datos del tamaño de foco, se procede a la medición de la fotografía de cada una de las tomas realizadas. En las siguientes tablas se muestran los datos que se obtuvieron de las fotografías con su medida sin la escala correcta y la medida con la escala adecuada. Las tablas están numeradas desde la tabla 3.3 hasta la tabla 3.9. La forma de presentar los datos se hace de 10 en 10 datos debido a las características de las probetas en las que se ensayó. Por ejemplo, para la toma número 1 la medida en milímetros es de 62,7 mm y de 100,1 mm. Esta medida se obtiene luego de la medida de la fotografía en pixeles. Si se mide el tamaño de foco con estas medidas se tendría una medida errónea lo cual no es el valor que se tiene realmente como tamaño de foco del equipo de rayos X. En las dimensiones en la escala adecuada ya se tiene la medida correcta y se procede a la medición del tamaño del foco efectivo del equipo de rayos X en la parte subsiguiente.

Tabla 3. 3. Datos obtenidos de las fotografías de las radiografías (Tomas 1 – 10)

Probeta	Toma	Dimensiones fotografía				Dimensiones en escala adecuada			
		N°	N°	Dimensiones en Pixeles [Px]	Dimensiones en milímetros [mm]	Dimensiones en Pixeles [Px]	Dimensiones en milímetros [mm]	Dimensiones en Pixeles [Px]	Dimensiones en milímetros [mm]
1	1	237	416	62,7	110,1	151	265	40,0	70,1
	2	219	384	57,9	101,6	151	265	40,0	70,1
	3	218	382	57,7	101,1	151	265	40,0	70,1
	4	214	376	56,6	95,5	151	265	40,0	70,1
	5	241	422	63,8	111,7	151	265	40,0	70,1
	6	242	423	64,0	111,9	151	264	40,0	69,9
	7	244	427	64,6	113,0	151	264	40,0	69,9
	8	236	414	62,4	109,5	151	265	40,0	70,1
	9	230	403	60,9	106,6	151	265	40,0	70,1
	10	239	419	63,2	110,9	151	265	40,0	70,1

Tabla 3. 4. Datos obtenidos de las fotografías de las radiografías (Tomas 11 – 20)

Probeta	Toma	Dimensiones fotografía				Dimensiones en escala adecuada			
		N°	N°	Dimensiones en Pixeles [Px]	Dimensiones en milímetros [mm]	Dimensiones en Pixeles [Px]	Dimensiones en milímetros [mm]	Dimensiones en Pixeles [Px]	Dimensiones en milímetros [mm]
2	11	242	427	64,0	110,9	151	266	40,0	70,5
	12	245	430	65,0	113,8	151	265	40,0	70,2
	13	245	430	65,0	113,8	151	265	40,0	70,2
	14	243	427	64,2	112,9	151	266	40,0	70,5

Tabla 3.4. Datos obtenidos de las fotografías de las radiografías (Tomas 11 – 20)

(Continuación)

Probeta	Toma	Dimensiones fotografía				Dimensiones en escala adecuada			
		Dimensiones en Pixeles [Px]		Dimensiones en milímetros [mm]		Dimensiones en Pixeles [Px]		Dimensiones en milímetros [mm]	
2	15	243	426	64,2	112,6	151	265	40,0	70,2
	16	245	428	65,0	113,4	151	264	40,0	70,0
	17	246	431	65,2	114,1	151	265	40,0	70,2
	18	246	431	65,2	114,1	151	265	40,0	70,2
	19	248	434	65,7	114,8	151	264	40,0	70,0
	20	242	426	64,0	112,6	151	266	40,0	70,5

Tabla 3.5. Datos obtenidos de las fotografías de las radiografías (Tomas 21 – 30)

Probeta	Toma	Dimensiones fotografía				Dimensiones en escala adecuada			
		Dimensiones en Pixeles [Px]		Dimensiones en milímetros [mm]		Dimensiones en Pixeles [Px]		Dimensiones en milímetros [mm]	
3	21	243	425	64,2	112,4	151	264	40,0	70,0
	22	236	414	62,6	109,5	151	265	40,0	70,2
	23	242	423	64,0	111,9	151	264	40,0	70,0
	24	240	422	63,5	111,7	151	266	40,0	70,5
	25	244	427	64,5	112,9	151	264	40,0	70,0
	26	241	424	63,8	112,2	151	266	40,0	70,5
	27	243	425	64,2	112,4	151	264	40,0	70,0
	28	242	424	64,0	112,2	151	265	40,0	70,2
	29	241	423	63,8	111,9	151	265	40,0	70,2
	30	241	421	63,8	111,4	151	264	40,0	70,0

Tabla 3.6. Datos obtenidos de las fotografías de las radiografías (Tomas 31 – 40)

Probeta	Toma	Dimensiones fotografía				Dimensiones en escala adecuada			
		Dimensiones en Pixeles [Px]		Dimensiones en milímetros [mm]		Dimensiones en Pixeles [Px]		Dimensiones en milímetros [mm]	
4	31	232	406	61,4	107,4	151	264	40,0	70,0
	32	236	412	62,6	109,0	151	264	40,0	70,0
	33	231	406	61,1	107,4	151	266	40,0	70,5
	34	231	405	61,1	107,1	151	265	40,0	70,2
	35	228	398	60,4	105,2	151	264	40,0	70,0
	36	226	393	59,9	104,0	151	263	40,0	69,5
	37	225	394	59,4	104,2	151	265	40,0	70,2
	38	224	394	59,2	104,2	151	266	40,0	70,5
	39	225	394	59,4	104,2	151	265	40,0	70,2
	40	225	393	59,4	104,0	151	264	40,0	70,0

Tabla 3. 7. Datos obtenidos de las fotografías de las radiografías (Tomas 41 – 50)

Probeta	Toma	Dimensiones fotografía				Dimensiones en escala adecuada			
		N°	Dimensiones en Pixeles [Px]		Dimensiones en milímetros [mm]		Dimensiones en Pixeles [Px]		Dimensiones en milímetros [mm]
5	41	239	417	63,3	110,2	151	264	40,0	70,0
	42	242	424	64,0	112,2	151	265	40,0	70,2
	43	237	417	62,8	110,2	151	266	40,0	70,5
	44	243	424	64,2	112,2	151	264	40,0	70,0
	45	243	423	64,2	111,9	151	263	40,0	69,5
	46	241	424	63,8	112,2	151	266	40,0	70,5
	47	245	428	65,0	113,4	151	264	40,0	70,0
	48	244	428	64,5	113,4	151	265	40,0	70,2
	49	240	421	63,5	111,4	151	265	40,0	70,2
	50	245	426	65,0	112,6	151	263	40,0	69,5

Tabla 3. 8. Datos obtenidos de las fotografías de las radiografías (Tomas 51 – 60)

Probeta	Toma	Dimensiones fotografía				Dimensiones en escala adecuada			
		N°	Dimensiones en Pixeles [Px]		Dimensiones en milímetros [mm]		Dimensiones en Pixeles [Px]		Dimensiones en milímetros [mm]
6	51	240	422	63,5	111,7	151	266	40,0	70,5
	52	242	424	64,0	112,2	151	265	40,0	70,2
	53	241	424	63,8	112,2	151	266	40,0	70,5
	54	243	425	64,2	112,4	151	264	40,0	70,0
	55	243	426	64,2	112,6	150	265	39,8	70,2
	56	241	420	63,8	111,2	151	263	40,0	69,5
	57	245	427	65,0	112,9	151	263	40,0	69,5
	58	242	423	64,0	111,9	151	264	40,0	70,0
	59	242	424	64,0	112,2	151	265	40,0	70,2
	60	243	426	64,2	112,6	151	265	40,0	70,2

Tabla 3. 9. Datos obtenidos de las fotografías de las radiografías (Tomas 61 – 70)

Probeta	Toma	Dimensiones fotografía				Dimensiones en escala adecuada			
		N°	Dimensiones en Pixeles [Px]		Dimensiones en milímetros [mm]		Dimensiones en Pixeles [Px]		Dimensiones en milímetros [mm]
7	61	246	433	65,2	114,6	151	266	40,0	70,5
	62	242	424	64,0	112,2	151	265	40,0	70,2
	63	239	417	63,3	110,2	151	264	40,0	70,0
	64	240	421	63,5	111,4	151	265	40,0	70,2
	65	242	422	64,0	111,7	151	264	40,0	70,0
	66	244	425	64,5	112,4	151	263	40,0	69,5
	67	244	425	64,5	112,4	151	263	40,0	69,5
	68	244	426	64,5	112,6	151	264	40,0	70,0
	69	240	422	63,5	111,7	151	266	40,0	70,5
	70	235	413	62,1	109,3	151	266	40,0	70,5

3.3.2 DATOS DEL TAMAÑO DE FOCO (FOCAL SPOT)

Para la medición del tamaño de foco se debe conocer tanto la medida horizontal (X) como la medida vertical (Y). La medida del tamaño de foco es posible gracias al software ISee. En la figura 3.4 se puede apreciar la interfaz que se maneja en el programa para proceder a la medición del tamaño del foco, que viene a ser la mancha de forma rectangular que se observa en la radiografía analizada. Cabe comentar que el programa es sugerido por la designación ASTM E1165 - 12 con el siguiente link de referencia: <http://dir.bam.de/ic/>.

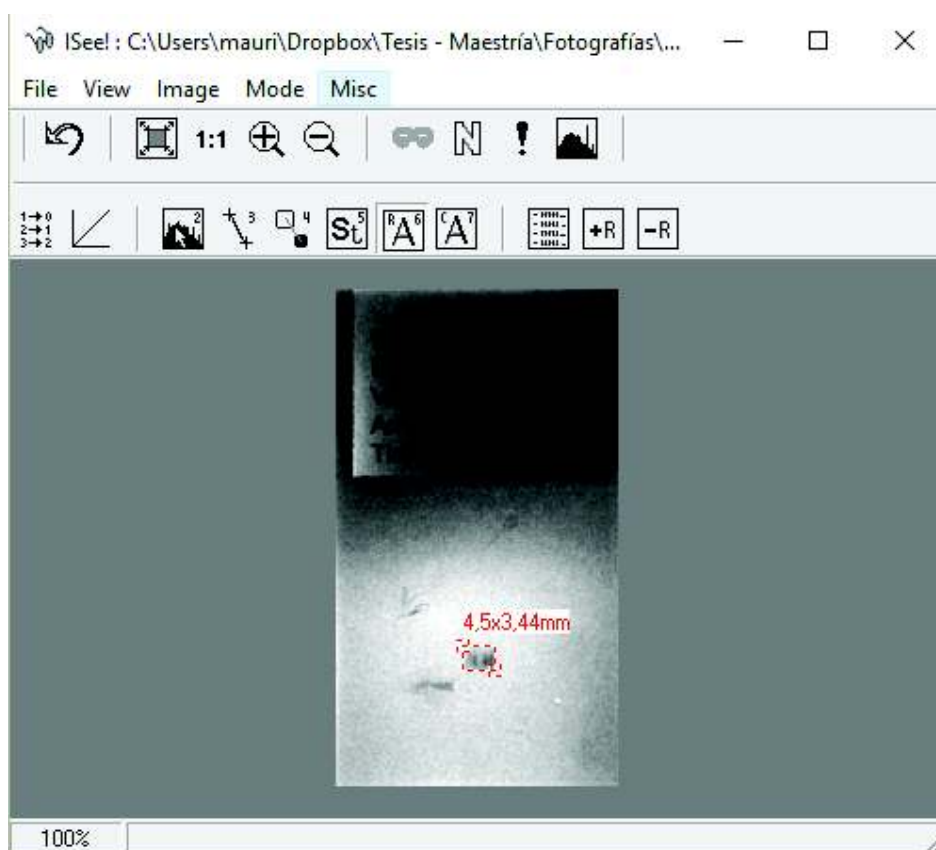


Figura 3. 4. Interfaz del programa ISee sugerido por la designación ASTM E1165 - 12

Fuente: Propia

Como se observa en la figura 3.3, es importante tomar los límites que se tienen en la diferencia de contrastes entre la mancha que significa el foco y el contraste que se tiene de la película radiográfica sin ninguna señal en particular. Es necesario acotar que cada radiografía analizada tiene su propia identificación y cada una de estas se pueden observar a detalle en el ANEXO 4.

La manera de realizar la medición se efectúa de la forma mostrada en la figura 3.5. El detalle que se observa pertenece a la toma 1 donde las medidas para X son de 4,50 mm y de Y a 3,44 mm.



Figura 3. 5. Dimensiones del tamaño de foco tomadas del programa ISee

Fuente: Propia

Los datos obtenidos se muestran desde la tabla 3.10 hasta la 3.16 donde se tienen datos que varían un poco del otro y esto se debe a que se tomaron 10 grupos de datos por cada una de las probetas realizadas. Por ejemplo, para la probeta 1 se tienen 10 tomas de radiografía, por lo tanto 10 tomas de tamaño de foco tanto en X como en Y y así sucesivamente para las demás probetas, llegándose a tener un número total de 70 tomas. Además, para evidenciar las pruebas realizadas del presente trabajo, se tienen registros de los ensayos efectuados y que se pueden ver en el ANEXO 5.

Tabla 3. 10. Datos obtenidos del tamaño de foco – Tomas 1 – 10 (izquierda) y 11 – 20 (derecha)

Probeta	Toma	Dimensiones		Probeta	Toma	Dimensiones	
		Horizontal X [mm]	Vertical Y [mm]			Horizontal X [mm]	Vertical Y [mm]
1	1	4,50	3,44	2	11	4,76	3,97
	2	4,50	3,44		12	4,50	3,97
	3	4,50	3,44		13	4,50	3,70
	4	4,50	3,70		14	4,23	3,97
	5	4,50	3,70		15	4,23	3,70
	6	4,23	3,44		16	4,23	3,44
	7	4,23	3,44		17	4,50	3,97
	8	4,50	3,44		18	4,23	3,70
	9	4,50	3,70		19	4,23	3,44
	10	4,50	3,44		20	4,50	3,70

Tabla 3. 11. Datos obtenidos del tamaño de foco – Tomas 21 – 30 (izquierda) y 31 – 40 (derecha)

Probeta	Toma	Dimensiones		Probeta	Toma	Dimensiones	
		N°	N°			Horizontal X [mm]	Vertical Y [mm]
3	21			4	31		
	22	4,50	3,70		32	4,50	3,44
	23	4,50	3,70		33	4,50	3,97
	24	4,23	3,97		34	4,50	3,97
	25	4,23	3,70		35	4,50	3,97
	26	4,23	3,97		36	4,50	3,97
	27	4,50	3,97		37	4,50	3,97
	28	4,23	3,97		38	4,50	3,97
	29	4,50	3,97		39	4,50	3,70
	30	4,23	3,97		40	4,50	3,70

Tabla 3. 12. Datos obtenidos del tamaño de foco – Tomas 41 – 50 (izquierda) y 51 – 60 (derecha)

Probeta	Toma	Dimensiones		Probeta	Toma	Dimensiones	
		N°	N°			Horizontal X [mm]	Vertical Y [mm]
5	41			6	51		
	42	4,50	3,44		52	4,50	3,70
	43	4,23	3,44		53	4,50	3,97
	44	//	//		54	4,23	3,97
	45	4,50	3,70		55	4,50	3,97
	46	4,50	3,70		56	4,50	3,70
	47	4,23	3,44		57	4,50	3,97
	48	4,23	3,97		58	4,50	3,97
	49	4,50	3,70		59	4,50	3,97
	50	4,23	3,70		60	4,50	3,97

Tabla 3. 13. Datos obtenidos del tamaño de foco – Tomas 61 – 70

Probeta	Toma	Dimensiones			
		N°	N°	Horizontal X [mm]	Vertical Y [mm]
7	61			4,50	3,70
	62			4,50	3,44
	63			4,50	3,44
	64			4,50	3,44
	65			4,23	3,44
	66			4,23	3,44
	67			4,23	3,44
	68			4,50	3,70
	69			4,23	3,44
	70			4,50	3,70

Como se pudo ver los datos obtenidos muestran cierta uniformidad, pero que deben ser analizados para hallar un valor representativo que refleje el valor más cercano a la realidad del ensayo.

Para la probeta N°5, se tienen 9 datos en total, ya que la toma 43 tuvo falla en su revelado. Esto se pudo deber a defectos en el revelador y su posterior fijado. La imagen se puede observar en el ANEXO 4.

Para poder tener un valor representativo del tamaño de foco del equipo de rayos X del laboratorio, lo que se propone realizar es un análisis estadístico que se muestra en la parte siguiente donde se contemplan conceptos importantes de la estadística experimental para poder validar los resultados obtenidos.

3.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS

El tratamiento de los datos es importante para obtener un valor representativo del tamaño de foco obtenido mediante el ensayo normalizado realizado. Como se ha mostrado la toma de datos se ha realizado en 7 probetas que tienen características diferentes en cuanto al espesor de estas y al diámetro que tiene cada una. En las tablas 3.10 hasta la 3.16 correspondientes a los datos del tamaño de foco se aprecian valores bastante uniformes que dan una idea que la variabilidad del ensayo ha sido mínima, pero que de todos modos requiere de un análisis estadístico para tener un fundamento de estadística experimental que refuerce los datos obtenidos.

En las mismas tablas de resultados se aprecia el manejo de 10 datos por cada probeta, sumando un total de 70 tomas realizadas. De todas estas tomas se plantea conocer el valor que estadísticamente represente a todos ellos y proceder con el cálculo posterior de penumbra geométrica.

Por la naturaleza de la toma de datos, es decir, tomas de 10 datos por cada probeta analizada se deberá usar una distribución T o distribución Student, ya que con esta distribución se podrá validar las 10 tomas realizadas en cada probeta, debido a que se manejan datos aleatorios que en total sean menores a 30. Es importante mencionar que el tratamiento se realizará de 10 datos para cada probeta, es decir, 7 análisis individuales. Al final se plantea contar con un valor que represente a los 10 datos. Es decir que con los 70 datos se tendrán 7 valores representativos. Al final se procederá con un tratamiento similar con los

7 datos obtenidos y por lo tanto se tendrá el valor representativo del tamaño de foco y con el fundamento estadístico que se desea.

3.4.1 DISTRIBUCIÓN T

Para utilizar convenientemente la distribución T o de Student, se deben conocer los términos empleados en esta.

Desviación típica o desviación standard (S)

Es la medida que toma en cuenta la dispersión de los datos aleatorios de una muestra tomando como referencia a la media aritmética.

$$S = \sqrt{\frac{\sum(X_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad \text{Ecuación (14)}$$

Donde:

X_i = Dato

\bar{x} = Media de la muestra

n = Tamaño de la muestra

Grados de libertad (ν)

Es la medida del número de datos menos la unidad.

$$\nu = n - 1 \quad \text{Ecuación (15)}$$

Nivel de confianza (NC)

Es la probabilidad de encontrar el dato que represente a la muestra en el grupo de datos que se han tomado. El nivel de confianza se lo toma antes de efectuar algún cálculo y hace posible anticiparse a obtener los valores que serán los representativos de la muestra tomada.

Intervalo de confianza (IC)

Es un intervalo que contiene al valor representativo de la muestra tomada y está definido por extremos aleatorios que consideran el nivel de confianza seleccionado. Mediante los valores t (ver ANEXO 6) (Departamento de estadística e Investigación Operativa Universidad de Valencia, s.f.) para una probabilidad de $\alpha/2$ se obtienen los límites inferiores y superior donde se encontrará el dato que represente a la toma de las muestras.

$$IC = \bar{X} \pm t_{n-1, \alpha/2} * \frac{S}{\sqrt{n}} \quad \text{Ecuación (16)}$$

Donde:

$t_{n-1, \alpha/2}$ = Es el valor t usando la probabilidad $\alpha/2$

Con los datos obtenidos se procede a obtener el error estándar de la media ($S_{\bar{x}}$) que se da mediante la ecuación 4.

$$S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad \text{Ecuación (17)}$$

El análisis se efectúa mediante la distribución t de dos colas debido a que la probabilidad de encontrar el dato que represente a la muestra puede estar próximo a los intervalos superiores como inferiores de los datos tomados. Para lograr la obtención de todos los datos necesarios se deben calcular valores como: el tamaño de la muestra, los grados de libertad de la muestra para 10 datos, la media, la desviación estándar, el nivel de confianza, el valor de alfa, el valor t de la tabla (ver ANEXO 6), el error estándar de la media, el límite superior, así como el límite inferior y por último el intervalo de confianza que se toma del 98%, ya que se quiere el mejor acercamiento de los datos de la muestra a la realidad.

Siguiendo todos los pasos descritos se tiene el análisis siguiente que se muestra en la tabla 3.14.

Tabla 3. 14. Resultados estadísticos para análisis en X y en Y (Tomas 1-10)

Parámetro	Símbolo	Unidad	Resultados para datos en X	Resultados para datos en Y
Tamaño de la muestra	n	//	10	10
Grados de libertad	v	//	9	9
Media	\bar{X}	mm	4,45	3,52
Desviación estándar	S	mm	0,113841995766	0,125591931800
Nivel de confianza	NC	%	98	98
Alfa	α	%	2	2
Distribución T	T	//	2,821	2,821
Error estándar de la media	$S_{\bar{x}}$	mm	0,036000	0,039716
Límite superior	LS	mm	4,547556	3,630038
Límite inferior	LI	mm	4,344444	3,405962
Intervalo de confianza de 98%	IC	%	(4,547556; 4,344444)	(3,630038; 3,405962)

Con los datos obtenidos y con todos los datos del tamaño de foco se procede a rechazar los valores que no ingresan dentro del intervalo de confianza seleccionado anteriormente. Estos valores se descartan debido a que no están dentro de los límites tanto inferior como superior del análisis. En la tabla 3.15 se pueden observar los valores del tamaño de foco tanto en X como en Y para las tomas 1 a la 10. Se puede observar que los datos 6 y 7 pertenecientes a X han sido rechazados y retirados del análisis ya que no caben dentro del nivel de confianza del 98%. En lo que tiene que ver con los datos de Y, los datos 4, 5 y 9 han sido retirados por la misma razón.

Luego de realizado el ajuste de los datos se procede a obtener el promedio de estos datos que da un valor por el lote de tomas 1 a la 10, obteniéndose para el caso de 4,5 en X y de 3,44 en Y.

Tabla 3. 15. Datos filtrados en X y en Y (Tomas 1-10)

Probeta N°	Toma N°	Dimensión Horizontal X [mm]	Promedio Datos [mm]	Probeta N°	Toma N°	Dimensión Vertical Y [mm]	Promedio Datos [mm]
1	1	4,50	4,50	1	1	3,44	3,44
	2	4,50			2	3,44	
	3	4,50			3	3,44	
	4	4,50			6	3,44	
	5	4,50			7	3,44	
	8	4,50			8	3,44	
	9	4,50			10	3,44	
	10	4,50					

Para las demás probetas, se sigue un análisis similar, ya que se deben primero obtener los datos estadísticos del caso y luego rechazar los datos que no cumplen con el nivel de confianza seleccionado. Los valores se pueden observar desde la tabla 3.16 en adelante.

Además, para representación estadística se presentan las gráficas de cada análisis (Ver ANEXO 7), es decir que se presentan gráficas estadísticas tanto para los datos en X y en Y de todas las tomas y al final del promedio de los lotes. Es necesario acotar también que cada una de las gráficas considera los límites tanto inferiores y superiores considerados para tener la idea de donde están los datos. Estos gráficos están en función de la densidad de la probabilidad de encontrar los datos con los valores calculados de media, desviación estándar, grados de libertad y lo que concierne al análisis de distribución de Student.

Tabla 3. 16. Resultados estadísticos para análisis en X y en Y (Tomas 11-20)

Parámetro	Símbolo	Unidad	Resultados para datos en X	Resultados para datos en Y
Tamaño de la muestra	n	//	10	10
Grados de libertad	v	//	9	9
Media	\bar{X}	mm	4,39	3,76
Desviación estándar	S	mm	0,186574381950	0,209613400759
Nivel de confianza	NC	%	98	98
Alfa	α	%	2	2
Distribución T	T	//	2,821	2,821
Error estándar de la media	$S_{\bar{x}}$	mm	0,059000	0,066286
Límite superior	LS	mm	4,557439	3,942992
Límite inferior	LI	mm	4,224561	3,569008
Intervalo de confianza de 98%	IC	%	(4,557439; 4,224561)	(3,942992; 3,569008)

Tabla 3. 17. Datos filtrados en X y en Y (Tomas 11-20)

Probeta	Toma	Dimensión	Promedio	Probeta	Toma	Dimensión	Promedio
N°	N°	Horizontal X [mm]	Datos [mm]	N°	N°	Vertical Y [mm]	Datos [mm]
2	2	4,50	4,35	2	3	3,70	3,70
	3	4,50			5	3,70	
	4	4,23			8	3,70	
	5	4,23			10	3,70	
	6	4,23					
	7	4,50					
	8	4,23					
	9	4,23					
	10	4,50					

Tabla 3. 18. Resultados estadísticos para análisis en X y en Y (Tomas 21-30)

Parámetro	Símbolo	Unidad	Resultados para datos en X	Resultados para datos en Y
Tamaño de la muestra	n	//	10	10
Grados de libertad	v	//	9	9
Media	\bar{X}	mm	4,37	3,89
Desviación estándar	S	mm	0,142302494708	0,130422390716
Nivel de confianza	NC	%	98	98
Alfa	α	%	2	2
Distribución T	T	//	2,821	2,821
Error estándar de la media	$S_{\bar{x}}$	mm	0,045000	0,041243
Límite superior	LS	mm	4,491945	4,005347
Límite inferior	LI	mm	4,238055	3,772653
Intervalo de confianza de 98%	IC	%	(4,491945; 4,238055)	(4,005347; 3,772653)

Tabla 3. 19. Datos filtrados en X y en Y (Tomas 21-30)

Probeta	Toma	Dimensión	Promedio	Probeta	Toma	Dimensión	Promedio
N°	N°	Horizontal X [mm]	Datos [mm]	N°	N°	Vertical Y [mm]	Datos [mm]
3	4	4,23	4,23	3	2	3,97	3,97
	5	4,23			4	3,97	
	6	4,23			6	3,97	
	8	4,23			7	3,97	
	10	4,23			8	3,97	
					9	3,97	
					10	3,97	

Tabla 3. 20. Resultados estadísticos para análisis en X y en Y (Tomas 31-40)

Parámetro	Símbolo	Unidad	Resultados para datos en X	Resultados para datos en Y
Tamaño de la muestra	n	//	10	10
Grados de libertad	v	//	9	9
Media	\bar{X}	mm	4,50	3,84
Desviación estándar	S	mm	0,000000000000	0,188573593061
Nivel de confianza	NC	%	98	98
Alfa	α	%	2	2
Distribución T	T	//	2,821	2,821
Error estándar de la media	$S_{\bar{x}}$	mm	0,000000	0,059632
Límite superior	LS	mm	4,500000	4,004222
Límite inferior	LI	mm	4,500000	3,667778
Intervalo de confianza de 98%	IC	%	(4,500000; 4,500000)	(4,004222; 3,667778)

Tabla 3. 21. Datos filtrados en X y en Y (Tomas 31-40)

Probeta	Toma	Dimensión	Promedio	Probeta	Toma	Dimensión	Promedio
N°	N°	Horizontal X [mm]	Datos [mm]	N°	N°	Vertical Y [mm]	Datos [mm]
4	1	4,50	4,50	4	1	3,70	3,88
	2	4,50			3	3,97	
	3	4,50			4	3,97	
	4	4,50			5	3,97	
	5	4,50			6	3,97	
	6	4,50			7	3,97	
	7	4,50			8	3,97	
	8	4,50			9	3,70	
	9	4,50			10	3,70	
	10	4,50					

Tabla 3. 22. Resultados estadísticos para análisis en X y en Y (Tomas 41-50)

Parámetro	Símbolo	Unidad	Resultados para datos en X	Resultados para datos en Y
Tamaño de la muestra	n	//	9	9
Grados de libertad	v	//	8	8
Media	\bar{X}	mm	4,38	3,64
Desviación estándar	S	mm	0,142302494708	0,165596564645
Nivel de confianza	NC	%	98	98
Alfa	α	%	2	2
Distribución T	T	//	2,896	2,896
Error estándar de la media	$S_{\bar{x}}$	mm	0,047434	0,055199
Límite superior	LS	mm	4,517369	3,803189
Límite inferior	LI	mm	4,242631	3,483477
Intervalo de confianza de 98%	IC	%	(4,517369; 4,242631)	(3,803189; 3,483477)

Tabla 3. 23. Datos filtrados en X y en Y (Tomas 41-50)

Probeta	Toma	Dimensión	Promedio	Probeta	Toma	Dimensión	Promedio
N°	N°	Horizontal X [mm]	Datos [mm]	N°	N°	Vertical Y [mm]	Datos [mm]
5	1	4,50	4,50	5	4	3,70	3,70
	4	4,50			5	3,70	
	5	4,50			6	3,70	
	6	4,50			9	3,70	
	9	4,50			10	3,70	

Tabla 3. 24. Resultados estadísticos para análisis en X y en Y (Tomas 51-60)

Parámetro	Símbolo	Unidad	Resultados para datos en X	Resultados para datos en Y
Tamaño de la muestra	n	//	10	10
Grados de libertad	v	//	9	9
Media	\bar{X}	mm	4,47	3,92
Desviación estándar	S	mm	0,085381496825	0,113841995766
Nivel de confianza	NC	%	98	98
Alfa	α	%	2	2
Distribución T	T	//	2,821	2,821
Error estándar de la media	$S_{\bar{x}}$	mm	0,027000	0,036000
Límite superior	LS	mm	4,549167	4,017556
Límite inferior	LI	mm	4,396833	3,814444
Intervalo de confianza de 98%	IC	%	(4,5491674,396833)	(4,017556; 3,814444)

Tabla 3. 25. Datos filtrados en X y en Y (Tomas 51-60)

Probeta	Toma	Dimensión	Promedio	Probeta	Toma	Dimensión	Promedio
N°	N°	Horizontal X [mm]	Datos [mm]	N°	N°	Vertical Y [mm]	Datos [mm]
6	1	4,50	4,50	6	1	3,97	3,97
	2	4,50			3	3,97	
	3	4,50			4	3,97	
	5	4,50			5	3,97	
	6	4,50			7	3,97	
	7	4,50			8	3,97	
	8	4,50			9	3,97	
	9	4,50			10	3,97	
	10	4,50					

Tabla 3. 26. Resultados estadísticos para análisis en X y en Y (Tomas 61-70)

Parámetro	Símbolo	Unidad	Resultados para datos en X	Resultados para datos en Y
Tamaño de la muestra	n	//	10	10
Grados de libertad	ν	//	9	9
Media	\bar{X}	mm	4,39	3,52
Desviación estándar	S	mm	0,139427400463	0,125591931800
Nivel de confianza	NC	%	98	98
Alfa	α	%	2	2
Distribución T	T	//	2,821	2,821
Error estándar de la media	$S_{\bar{x}}$	mm	0,044091	0,039716
Límite superior	LS	mm	4,516380	3,630038
Límite inferior	LI	mm	4,267620	3,405962
Intervalo de confianza de 98%	IC	%	(4,516380; 4,267620)	(3,630038; 3,405962)

Tabla 3. 27. Datos filtrados en X y en Y (Tomas 61-70)

Probeta	Toma	Dimensión	Promedio	Probeta	Toma	Dimensión	Promedio
N°	N°	Horizontal X [mm]	Datos [mm]	N°	N°	Vertical Y [mm]	Datos [mm]
7	1	4,50	4,50	7	2	3,44	3,44
	2	4,50			3	3,44	
	3	4,50			4	3,44	
	4	4,50			5	3,44	
	8	4,50			6	3,44	
	10	4,50			7	3,44	
						9	

Para obtener un dato promedio que cumpla con el criterio estadístico experimental empleado, se procede a realizar un análisis adicional con los datos obtenidos de cada lote analizado. En la tabla 3.28 se muestran los valores para el análisis estadístico final.

Tabla 3. 28. Datos de los promedios de los lotes en X y en Y

Lote	Dimensiones	
	Horizontal X [mm]	Vertical Y [mm]
1	4,50	3,44
2	4,35	3,70
3	4,23	3,97
4	4,50	3,88
5	4,50	3,70
6	4,50	3,97
7	4,50	3,44

De la misma manera se procede a obtener los datos estadísticos necesarios para poder efectuar el análisis final que permita dar a conocer el valor promedio del tamaño de foco experimental tanto en X como Y. Este análisis recoge los datos promedios de cada probeta, es decir los promedios que se obtuvieron del análisis

estadístico de cada 7 datos, es decir al final se obtienen 7 valores promedios cada uno de ellos representando a 10 datos. En la tabla 3.29 se pueden observar los valores estadísticos obtenidos para realizar el análisis final que permitirá obtener el valor real del foco del equipo de rayos X.

Tabla 3. 29. Resultados estadísticos para análisis en X y en Y del promedio de los lotes

Parámetro	Símbolo	Unidad	Resultados para datos en X	Resultados para datos en Y
Tamaño de la muestra	n	//	7	7
Grados de libertad	ν	//	6	6
Media	\bar{X}	mm	4,44	3,73
Desviación estándar	S	mm	0,108166538264	0,226452980508
Nivel de confianza	NC	%	98	98
Alfa	α	%	2	2
Distribución T	T	//	3,143	3,143
Error estándar de la media	$S_{\bar{x}}$	mm	0,040883	0,085591
Límite superior	LS	mm	4,568496	3,997585
Límite inferior	LI	mm	4,311504	3,459558
Intervalo de confianza de 98%	IC	%	(4,568496; 4,311504)	(3,997585; 3,459558)

En la tabla 3.30 se presentan los datos filtrados, lo cual se ha obtenido de rechazar los valores que no caen dentro de los límites para de ahí obtener los valores finales que representan a toda la muestra obtenida con la experimentación de la obtención del tamaño del foco por medio del método normalizado “pinhole imaging”.

Tabla 3. 30. Datos filtrados en X y en Y del promedio de los lotes

Promedio	Dimensión	Promedio	Promedio	Dimensión	Promedio
Lote	Horizontal X [mm]	Datos X [mm]	Lote	Vertical Y [mm]	Datos Y [mm]
1	4,50	4,48	2	3,70	3,84
2	4,35		3	3,97	
4	4,50		4	3,88	
5	4,50		5	3,70	
6	4,50		6	3,97	
7	4,50				

Por lo tanto, las dimensiones del tamaño de foco del equipo de radiografía industrial analizado son de 4,48 en X y de 3,84 en Y. El tamaño de foco del equipo es la raíz cuadrada de la suma de X al cuadrado y Y al cuadrado, es decir que se aplica el teorema de Pitágoras.

Como se observa en la figura 3.6 el foco como tal tiene dimensiones tanto de longitud como de altura, es por este motivo que es posible aplicar el teorema de Pitágoras ya mencionado. Es por esta razón que si se toma en cuenta solamente la diagonal de las dimensiones encontradas es posible conocer el tamaño de foco que será utilizado en la ecuación de la penumbra geométrica.

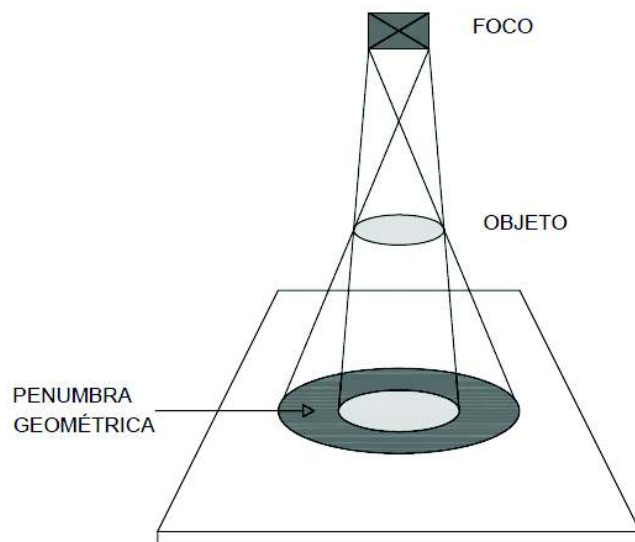


Figura 3. 6. Detalle de foco, objeto y penumbra geométrica

Fuente: Propia

La ecuación queda definida por la siguiente relación:

$$f = \sqrt{(X)^2 + (Y)^2} \quad \text{Ecuación (18)}$$

Las dimensiones tanto de X como de Y, así como del valor de f que es el valor con el que se trabaja se pueden observar en la figura 3.7.

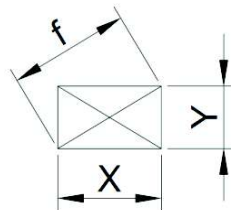


Figura 3. 7. Dimensiones del foco del equipo

Fuente: Propia

Donde:

f : Es el tamaño de foco del equipo que se utiliza en la ecuación de penumbra geométrica

X : Es la dimensión en el eje horizontal

Y : Es la dimensión en el eje vertical

Para obtener el valor tanto real como el valor teórico del tamaño de foco del equipo de rayos X se debe proceder de la siguiente manera:

Para obtener el tamaño de foco real (f_r), se debe proceder con los datos experimentales y que son propios del presente trabajo y para obtener el tamaño de foco teórico (f_t), se debe proceder con los datos del fabricante, es decir los datos del manual del equipo (Ver ANEXO 1).

Una vez que se ha verificado los valores previamente obtenidos, se puede conocer lo siguiente:

$$f_r = \sqrt{(X_r)^2 + (Y_r)^2} = \sqrt{(4,48)^2 + (3,84)^2} = \mathbf{5,90\ mm}$$

y

$$f_t = \sqrt{(X_t)^2 + (Y_t)^2} = \sqrt{(3,20)^2 + (3,20)^2} = \mathbf{4,52\ mm}$$

Es con estos valores con los que se trabajará más adelante, para la obtención de la penumbra geométrica.

CAPÍTULO 4

OBTENCIÓN DE LA PENUMBRA GEOMÉTRICA

Para obtener el valor de penumbra geométrica se requiere previamente el dato del tamaño de foco, es por tal motivo que en el capítulo anterior se trató sobre la obtención del tamaño de foco y con todos los procedimientos que demanda el desarrollo del ensayo. El presente capítulo busca encontrar el valor real que se tiene de penumbra geométrica haciendo un contraste con el valor teórico. Además, se toma en cuenta obtener el error relativo que se tiene al tomar en cuenta los valores de penumbra geométrica real o experimental y teórica o del manual del equipo de rayos X. Todo el procedimiento y algunos aspectos importantes para el desarrollo del capítulo se detalla a continuación.

4.1 PROCEDIMIENTO EFECTUADO

Considerar un procedimiento es poder elaborar un proceso sistemático donde se puedan abarcar los aspectos más importantes que se deben tomar en cuenta en la obtención de la penumbra geométrica. En el presente apartado se considera una primera parte donde se toma en cuenta el principio en el que se basa el método que también se lo trató en el capítulo 1 como aporte teórico, pero con algunos aportes importantes que ayuden al entendimiento que se sigue para obtener la penumbra geométrica, y se considera una segunda parte que toma en cuenta el desarrollo del proceso seguido para obtener el valor de la penumbra geométrica de las probetas soldadas.

4.1.1 PRINCIPIO DEL MÉTODO

El principio del método se basa en conocer la geometría de la realización del ensayo. Como se pudo conocer en la determinación del tamaño de foco se manejó una geometría recomendada por la designación ASTM E1165 - 12.

En la figura 4.1 se pueden observar 3 configuraciones de realización del ensayo y cada una de ellas con sus características propias.

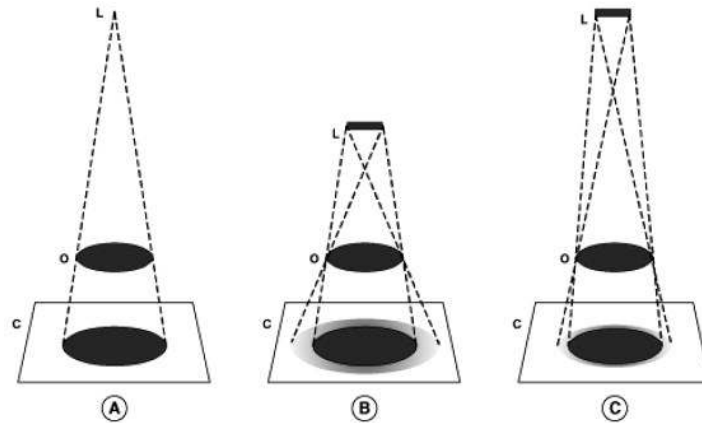


Figura 4. 1. Esquema de los principios geométricos de la penumbra geométrica (Kodak, 1980)
 – L: Foco emisor – o: Objeto a ser irradiado – c: Detector o película radiográfica.

Si se considera que el foco emisor es un punto, la radiación emitida sería originada a través de ese punto y actuaría de la manera que se observa en la parte A de la figura 4.1. La incidencia de rayos X se daría de tal manera que no se produciría penumbra geométrica, pero esto no ocurre en la realidad. Como se puede observar en la parte B se tiene un foco emisor de forma rectangular lo cual, si se da en la realidad, ya que el foco emisor tiene medidas ya definidas por el fabricante. Se debe notar además que las distancias del foco al objeto en la parte B y C son diferentes. Esto se debe a que a mayor distancia desde el foco al objeto o probeta a ser irradiada se tiene menor valor de la penumbra geométrica. Se debe tener claro que el manejo de las distancias se debe dar de acuerdo a la recomendación del manual de operación del equipo de rayos X.

4.1.2 DESARROLLO DEL MÉTODO

Como ya se ha comentado anteriormente para evaluar la calidad de las imágenes radiográficas de alguna probeta en particular se consideran algunos aspectos como son la densidad radiográfica o también los indicadores de calidad de imagen. Es importante comentar que los parámetros mencionados son importantes, pero en fases subsiguientes al cálculo de la penumbra geométrica. Es por las razones indicadas que el cálculo de la penumbra geométrica se vuelve

importante en los cálculos iniciales para efectuar una radiografía a probetas soldadas como en el presente proyecto.

En la figura 4.2 se puede observar esquemáticamente los parámetros que intervienen en una toma radiográfica. Se puede apreciar que es algo similar a la obtención del foco, donde se tienen distancias que separan el foco emisor del objeto o probeta a ser radiografiada y la otra distancia que es la separación entre el objeto con el detector o película radiográfica.

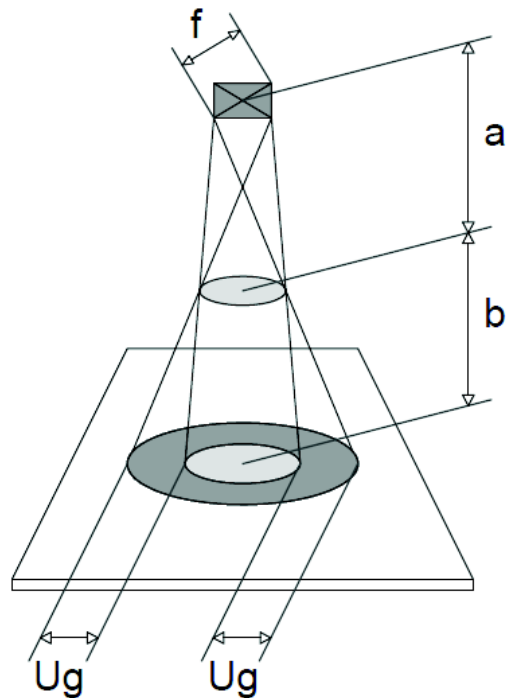


Figura 4. 2. Esquema de parámetros que intervienen en la penumbra geométrica

Fuente: Propia

La penumbra geométrica (U_g) puede ser calculada con la siguiente relación:

$$U_g = f * \frac{b}{a} \quad \text{Ecuación (19)}$$

Donde:

f : Es el tamaño de foco.

a : Es la distancia desde el foco emisor hasta el objeto o probeta a radiografiar. Se debe especificar que se considera a distancia hasta la cara frontal de la probeta a radiografiar.

b : Es la distancia desde la probeta a radiografiar hasta el detector o película radiográfica. Es importante notar que se trabaja con película radiográfica por lo cual desde ahora se referirá solamente a dicha película.

Es necesario comentar que para realizar un ensayo a una probeta soldada se debe considerar que una de las distancias usadas en la fórmula sufre una variante y esta es que la distancia que separa a la probeta soldada de la película radiográfica (b) pasa a ser solamente el espesor de la probeta soldada mencionada (t). La representación de la dimensión t se puede observar en la figura 4.3.

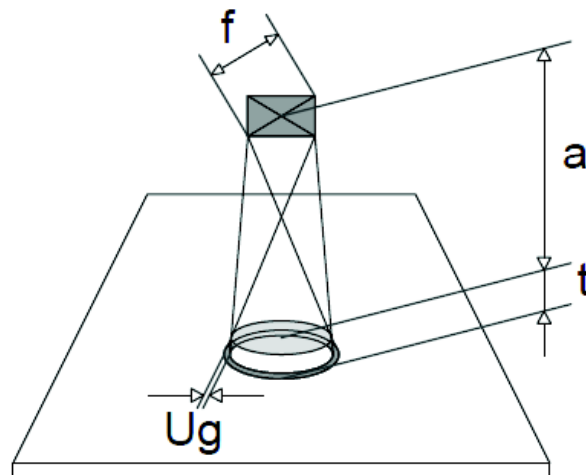


Figura 4. 3. Esquema de parámetros que intervienen en la penumbra geométrica considerando el espesor como distancia objeto - detector

Fuente: Propia

Donde la ecuación queda representada por la ecuación 7.

$$U_g = f * \frac{t}{a}$$

Ecuación (20)

Donde:

t : Distancia desde la probeta a radiografiar hasta la película radiográfica. Es decir, esta distancia es el espesor de la probeta soldada.

4.1.2.1 Ejemplo de cálculo

Si se consideran las variables hasta ahora estudiadas y con valores de las distancias arbitrariamente se tiene lo siguiente:

$$U_g = f * \frac{t}{a} = \left(5,90 \text{ mm} * \frac{20 \text{ mm}}{500 \text{ mm}} \right) = \mathbf{0,24 \text{ mm}}$$

En la sección T-274 del artículo 2 del ASME V versión 2010, se tiene una tabla en la que se recomiendan valores de penumbra de acuerdo al espesor. Para el caso calculado en el ejemplo de cálculo anterior se podría decir que de acuerdo al espesor el valor de penumbra geométrica obtenido es el adecuado para proseguir con los cálculos posteriores propios de una toma radiográfica. En la tabla 4.1 se pueden observar los valores de penumbra geométrica aceptados en el código ASME V 2010.

Tabla 4. 1. Valores límites de penumbra geométrica recomendados en el código ASME V 2010

Espesor del material [mm]	U_g Máximo [mm]
Hasta 50	0,51
Desde 50 a 75	0,76
Entre 75 y 100	1,02
Mayor a 100	1,78

Para realizar un cálculo correcto de penumbra geométrica se debe proceder a la verificación de las distancias más adecuadas para realizar los ensayos en probetas y poder garantizar que los valores de penumbra no excedan los de la tabla 4.1. Por ejemplo, si se desea radiografiar una probeta con un valor recomendado en el manual del equipo (Ver ANEXO 1), se debe seleccionar un alejamiento de 700 mm. Pero hay ciertas situaciones en las que se requiere y se necesita que este valor tenga ciertas variantes, es decir que se pueden tener

acercamientos o alejamientos según sea el caso ya que espesor de la probeta también influye directamente en la ecuación de la penumbra geométrica.

4.2 PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS Y ERROR OBTENIDO

En esta parte se presentan los resultados, tanto de la penumbra geométrica real como la teórica a partir de los datos de foco real y teórico, además, de presentar el error que se ha obtenido tomando como referencia el tamaño de foco teórico. Para realizar los cálculos necesarios se han seleccionado 19 probetas soldadas de diferentes espesores y geometrías (Ver ANEXO 8), donde se considera el espesor total para efectuar la radiografía. El tomar en cuenta el espesor total es el considerar si la soldadura tiene pases de refuerzo que sobresalen del material base, así como de pases de raíz o de placas de respaldo. Todos esos espesores se suman al espesor de la placa base y se tiene un espesor total que es el considerado en los cálculos de penumbra. En la tabla 4.2 se pueden apreciar los datos obtenidos del error relativo que se tiene tomando en cuenta la penumbra geométrica teórica y la real o experimental.

Tabla 4. 2. Valores del error obtenido de la penumbra geométrica de las 19 probetas soldadas

Probeta N°	Tamaño foco real (fr) [mm]	Tamaño foco teórico (ft) [mm]	a [mm]	t [mm]	$U_{gr}=frxt/a$ [mm]	$U_{gt}=ftxt/a$ [mm]	Error Rel. %
1	5,90	4,52	700	14,7	0,1239000	0,0949200	30,5
2	5,90	4,52	350	22,8	0,3843429	0,2944457	30,5
3	5,90	4,52	700	8,6	0,0722329	0,0553377	30,5
4	5,90	4,52	700	17,7	0,1491857	0,1142914	30,5
5	5,90	4,52	700	13,5	0,1137857	0,0871714	30,5
6	5,90	4,52	700	13,6	0,1146286	0,0878171	30,5
7	5,90	4,52	700	13,9	0,1171571	0,0897543	30,5
8	5,90	4,52	700	13,0	0,1095714	0,0839429	30,5
9	5,90	4,52	700	21,1	0,1778429	0,1362457	30,5
10	5,90	4,52	700	14,5	0,1222143	0,0936286	30,5
11	5,90	4,52	700	12,4	0,1045143	0,0800686	30,5
12	5,90	4,52	700	21,0	0,1770000	0,1356000	30,5
13	5,90	4,52	700	8,0	0,0674286	0,0516571	30,5
14	5,90	4,52	700	15,0	0,1264286	0,0968571	30,5
15	5,90	4,52	700	19,5	0,1643571	0,1259143	30,5
16	5,90	4,52	700	14,1	0,1188429	0,0910457	30,5
17	5,90	4,52	700	19,0	0,1601429	0,1226857	30,5
18	5,90	4,52	700	6,0	0,0505714	0,0387429	30,5
19	5,90	4,52	700	4,0	0,0337143	0,0258286	30,5

Observando los datos obtenidos del error se puede establecer que los únicos parámetros que varían son los del tamaño de foco ya que considerando que las distancias y espesores son las mismas tanto para el valor de penumbra geométrica real como teórica, se puede establecer que el error siempre será el mismo. Pero se puede también comentar que es un valor considerable de penumbra y que puede ser determinante en la evaluación de alguna probeta ya que existen defectos en las probetas que en su medición pueden estar muy cerca del valor límite de aceptación y que si se tomará en cuenta solamente el tamaño de foco teórico se puede considerar que una discontinuidad se permita según normativas y códigos lo cual no es un análisis correcto.

CAPÍTULO 5

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Se presenta la discusión de los resultados obtenidos en los capítulos 3 y 4, tomando en cuenta aspectos importantes en cada uno de ellos y refiriéndose a las tablas de datos obtenidos en cuanto a la determinación del tamaño de foco, así como del análisis estadístico realizado para finalmente discutir los resultados que corresponden a la obtención de la penumbra geométrica.

5.1 DE LA DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE FOCO

Para el capítulo 3 se procedió a la determinación del tamaño de foco pero que tuvo algunas etapas que van desde la preparación de las probetas para seguir con la preparación del ensayo y posteriormente obtener unas tomas radiográficas que debían ser interpretadas y medidas para de esa manera obtener el tamaño de foco experimental del equipo.

Cada etapa tiene su importancia ya que es una después de la otra cómo se logra llegar al objetivo y aplicando la teoría y los procedimientos ya comentados que se alcanza obtener resultados que se van a discutir de la siguiente manera.

Una etapa fundamental es que para realizar todo el ensayo presentado en este proyecto se utilizó plomo como material indispensable para llegar a obtener los resultados del tamaño del foco. Para estar seguros de que el material utilizado fue efectivamente plomo se contó con el laboratorio de Metalurgia Extractiva (ver ANEXO 2) con el que se constató que el contenido plomo en las probetas es del 98,77%, lo cual da la idea de tener un plomo muy puro y por lo tanto poder seguir adelante en las tareas posteriores.

El total de probetas a las que se llegó es a 7 cada una con sus características definidas. El obtener 7 probetas con diferentes valores (ver tabla 3.1) se da

debido a que se quería obtener la mayor cantidad de datos y así poder descartar cualquier duda de la medida del tamaño de foco. Además, algo primordial es el poder utilizar un modelo de ensayo experimental que se basó en la distribución t o distribución de Student. La utilización de esta distribución se debe a que el manejo de los datos se realizó de 10 en 10 datos, es decir que para cada probeta se manejaron 10 tomas radiográficas, generando 10 datos tanto de la dimensión X del foco como de la dimensión Y del mismo.

Las probetas de plomo obtenidas luego de la fundición en el horno del laboratorio de Conformado Mecánico se laminaron para así obtener uniformidad en las medidas ya que luego de la fundición se tienen superficies no uniformes y que no pudo ser posible maquinar debido a la gran maleabilidad del plomo dentro de sus propiedades. Las probetas obtenidas tienen como dimensiones tanto de ancho como de largo de 40 mm y 50 mm respectivamente, únicamente limitadas por su espesor. La limitación se debe a que las brocas que se tienen una profundidad de perforación ya establecida por lo que los espesores a utilizarse fueron de 1,3; 3,3; 3,9 y 6,8 mm, para mayor detalle ver tabla 3.1.

Una tarea fundamental fue la realización de los orificios en el centro de las probetas. Para esto fue sumamente necesario contar con el laboratorio LABINTECDIMP donde se manejó la estación CAM de marca ROLAND MDX-40^a para la realización de los orificios que requirieron alta precisión. Para esto se utilizaron diferentes diámetros de brocas que fueron de 0,1; 0,2; 0,3 y 0,4 mm. La utilización de diferentes diámetros tuvo que ver con poder obtener más criterios para saber qué es lo que ocurre con un orificio que varíe y obtener mayores criterios para llegar a conclusiones finales que validen aún más los datos y en sí el trabajo presentado.

Para la realización del ensayo fue necesario contar con un parámetro llamado “factor de magnificación” que es el que permite obtener el tamaño de foco efectivo y que es el foco real experimental con el que se debería trabajar. En la tabla 3.2 se muestran los valores recomendados por la designación E 1165 -12, donde especifica que para focos teóricos o datos de focos del manual mayor a 2 mm utilizar un factor de magnificación de 1:1, y la sugerencia es la de utilizar

como distancias 0,5 m. El tamaño de foco teórico del equipo, es decir el del manual del equipo es de 3,2x3,2 mm dando como resultado un valor de 4,52 mm lo cual se constató que difiere del foco real.

De la fotografía 4.5 se puede observar cómo se procedió a realizar el ensayo, el cual requiere de los 3 elementos fundamentales que son: El foco o punto focal, la probeta de plomo con su orificio "pinhole" y por último el detector o película radiográfica que es donde se va a registrar la imagen del tamaño que tiene el foco del equipo de rayos X del laboratorio.

Todos los parámetros utilizados en el punto 3.2.3 son fundamentales ya que es de esta manera que se pueden llegar a los resultados esperados, y que además se sugieren en la designación analizada en este trabajo. Por ejemplo, uno de los parámetros sumamente importantes es el de operar al 75% del valor nominal del kilo-voltaje que da el equipo y además no superar una potencia de 600 W que se sugiere en la curva de operación del equipo de rayos X.

El manejo de las escalas adecuadas es sumamente importante ya que si no se realiza esto se puede comentar grandes errores que a la final repercuten en la toma de los datos del valor del tamaño de foco del equipo. Para esto lo que se ha utilizado es manejar los criterios de pixeles en la fotografía y ajustarla para llegar a la escala adecuada en mm y posterior mediante un software sugerido por la designación E 1165 – 12. El programa lleva como nombra ISee. Es justo con este programa que se pudo llegar a establecer los valores tanto de X como de Y del foco. Ver tablas desde la 3.10 hasta la 3.13.

El análisis estadístico permitió dar un tratamiento experimental a los datos ya que se tenían grupos de datos que se manejaron de 10 en 10. Para realizar el análisis estadístico de este caso se estableció como un nivel de confianza el valor del 98% ya que se deseaba estar lo más apegado que se pueda a la realidad. Ya con este dato inicial se llegó a establecer valores como la desviación estándar de las muestras, así como de los grados de libertad que se tienen con los datos. Luego de eso se pudo establecer mediante el nivel de confianza y con los datos que se obtuvieron, los intervalos de confianza que son sumamente

importantes para llegar a los límites superior e inferior de los datos. Fue con estos límites que se pudo conocer si los datos estaban dentro de estos límites y poder depurar los datos. Es decir, que con esto se podían descartar datos que estaban en las muestras y que no daban una confiabilidad con la que se partió. Con esto el valor del tamaño de foco se apegaba mucho más a la realidad. Ver tablas desde la 3.14 en el capítulo 3.

El análisis estadístico realizado garantiza que de todos los datos obtenidos se tenga un valor que represente a todos y cada uno de los datos con la confiabilidad seleccionada. Con todo el análisis estadístico realizado se llegó a obtener un valor del tamaño de foco real de 4,48x3,84 mm dando como resultado un foco de 5,90 mm que difiere del valor teórico y que es símbolo de que se tenga errores en la toma de medidas de discontinuidades de probetas soldadas.

5.2 DE LA OBTENICÓN DE LA PENUMBRA GEOMÉTRICA

Debido a que la obtención del valor de penumbra es un paso posterior a la de la determinación del foco del equipo los pasos iniciales son comunes para las dos partes.

Para esta parte es necesario poder discutir y resaltar que en el laboratorio de Ensayos No Destructivos se trabajan probetas de acero soldadas que no exceden un espesor de 50 mm, por lo cual el valor permitido de penumbra según el ASME V 2010 no deberá ser mayor a 0,51 mm (ver tabla 4.1). Con este antecedente se procedió a realizar los cálculos de 19 probetas diferentes cada una con sus medidas, tanto de espesor que es un valor fundamental para el ensayo y los valores pertinentes a la longitud y ancho de la misma, así como de la medida del espesor del pase de refuerzo y de raíz según fue el caso. En algunos casos las probetas tenían placas de respaldo por lo cual la medida también fue considerada.

Como se conoce, el valor de penumbra geométrica depende de 3 valores y entre ellos el espesor total que se va a irradiar, este valor del espesor se debe tomar

correctamente realizando la suma total del espesor nominal de la placa con las dimensiones del pase de refuerzo con el de raíz. Es por todo esto que se considera un espesor total a irradiar.

De todo esto se puede hacer hincapié que el error obtenido entre la penumbra teórica y la real es del 30.5%, un valor alto si se ve desde el punto de vista que se deben medir discontinuidades que puedan existir en una probeta soldada. La detección y evaluación de discontinuidades lineales es justo un buen trabajo que se puede plantear a futuro de este.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6.1 CONCLUSIONES

- El objetivo del presente trabajo fue logrado a cabalidad, ya que se pudo obtener experimentalmente el valor del tamaño de foco del equipo de radiografía industrial del Laboratorio de Ensayos No Destructivos, además, de determinar la penumbra geométrica que se tiene con el tamaño de foco encontrado, para de esa manera tener un criterio muy bien fundamentado sobre la evaluación de juntas soldadas.
- Con el trabajo aquí presentado, se tiene un aporte que favorece al entendimiento de los principios que rigen a la radiografía industrial como método de ensayo no destructivo a probetas soldadas. Además, se logra aportar a la investigación de técnicas que pueden ser acopladas a laboratorios de nuestro medio. Para el presente caso el método normalizado “Pinhole Imaging” es un método importante que ayuda a obtener en una imagen radiográfica, el tamaño de foco de un equipo de rayos X y con ese valor, hallar la penumbra geométrica que es importante en los cálculos radiográficos que se realizan en el laboratorio de Ensayos No Destructivos. Asimismo, se favorece a un mejoramiento de cálculos y un perfeccionamiento en cuanto al entendimiento de los parámetros de control de calidad en imágenes radiográficas que a su vez es de gran ayuda para la industria ecuatoriana.
- El error obtenido en cuanto a la penumbra geométrica (ver tabla 4.2) de todas las probetas analizadas es de 30,5%, lo cual indica que hay una relación que es directamente proporcional dada por la fórmula que únicamente va a depender del tamaño de foco. Esto se debe a que, si se

efectúa el cálculo con los datos teóricos y datos reales del foco se tienen las distancias constantes para ambos casos, ya que de ese modo se podría contrastar ambos datos. Esto significa que el error que se ha obtenido siempre se mantendrá para todos los casos en los que se realicen cálculos sin tomar el tamaño de foco real del equipo del laboratorio de Ensayos No Destructivos.

- Según la teoría, se dice que si se tiene un foco que sea puntual la penumbra geométrica en una toma radiográfica de una soldadura no existiría, pero esto no ocurre ya que los focos de equipos de rayos X y rayos gamma tienen dimensiones lo cual ocasiona la penumbra geométrica. Es por esto que se tienen mediciones erróneas en la evaluación de discontinuidades. Para el presente trabajo se han obtenido errores relativos los cuales dan a conocer que en realidad se tienen mediciones incorrectas de discontinuidades en probetas soldadas. Es necesario acotar que por mínimo que sea el error en una discontinuidad es decir que, si se tiene una medida similar considerada real y la otra teórica, igual se tiene error y que puede influir finalmente en los resultados esperados.
- Tomando en cuenta el foco teórico con el foco real o experimental del equipo de rayos X se tiene una variante clara, siendo el tamaño de foco experimental más grande que el teórico. Según el ensayo realizado se siguieron todos y cada uno de los pasos sugeridos para obtener el tamaño real del foco. Las variantes de uno al otro valor se pudieron haber dado por algunas situaciones como puede ser el envejecimiento del equipo, ya que el equipo de rayos X del laboratorio ya tiene sus años. Por el efecto del envejecimiento del equipo es muy posible que se tengan efectos de deterioro en el tubo de rayos catódicos provocando una medida mayor que la teórica.
- Para obtener tomas radiográficas que cumplan con los valores de penumbra geométrica se deben conocer los conceptos teóricos, pero

adicionalmente se debe tener en cuenta que los valores reales son fundamentales ya que dan las dimensiones de discontinuidades con un mayor grado de confianza. Todo esto repercutirá en la toma de medidas y en una correcta emisión de reportes y de criterios acorde a la realidad de la probeta analizada.

- Al realizar el ensayo “Pinhole Imaging” con los diferentes diámetros de agujeros en las probetas de plomo se puede apreciar en las tomas una tendencia a tener mejor definición de imagen con menores diámetros. Es decir que se tiene una mejor definición con el diámetro de agujero de 0,1 mm y así hasta tener la menor definición de las tomas con la probeta con diámetro de agujero de 0,4.
- Calidad de imagen es uno de los factores fundamentales dentro de la interpretación de radiografías, ya que es con una toma de buena calidad donde se podrán obtener datos veraces de una radiografía realizada de una probeta soldada.
- Se ha comentado que para la evaluación de probetas soldadas se tienen algunos criterios, el presente trabajo se ha enfocado en evaluar el error que se tiene al considerar un valor de foco experimental teniendo como referencia el foco real del equipo. La penumbra es un valor que se debe calcular antes de efectuar una toma radiográfica para saber mediante los cálculos si la toma se debe realizar o si se debe recalcularse para obtener los valores esperados. Es decir que la penumbra geométrica dará a conocer un parámetro fundamental para realizar una toma radiográfica.
- Los datos obtenidos del tamaño de foco (ver tablas desde la 3.10 hasta la 3.13) muestran una variabilidad de dato a dato por lo cual fue necesario plantear un análisis estadístico experimental para tratar los datos debido a que para obtener un valor confiable y que represente a las tomas realizadas se debe tener el grado de confiabilidad necesario que para el caso presente es el nivel de confianza.

6.2 RECOMENDACIONES

- Mientras más precisas sean las medidas que se tomen más exactos serán los valores obtenidos del tamaño de foco, esto haría posible obtener mayor afinamiento de los datos y por lo tanto mejorar los cálculos aún más. Es importante estar conscientes que por mínima que sea la mejora, siempre es importante hacer experimentación con mayores grados de exactitud.
- Es importante respetar las normas de seguridad de un laboratorio que trabaje con radiaciones ionizantes, ya que esto permite reducir significativamente los riesgos de sufrir accidentes radiológicos. Es claro que el laboratorio de Ensayos No Destructivos al tener la licencia de operación del equipo de rayos X y al tener a todos sus integrantes certificados y licenciados para operar el equipo el entendimiento de los riesgos es cabal pero que no está por demás pronunciarlos siempre para así poder transmitir estos conocimientos a los nuevos integrantes del laboratorio, así como a los estudiantes que frecuentan el mismo.
- La realización de los orificios en las probetas de plomo requirió del uso de una estación CAM de marca ROLAND MDX-40 debido a que la precisión que se requería era mayor que la que ofrece un taladro convencional. Esto se debe a que los diámetros de las brocas usadas son pequeños y que para lograr realizar los orificios se necesitaba tener un nivel de precisión mayor. Además, vale acotar que de la misma manera que se pueden mejorar los cálculos y las mediciones, al realizar orificios con mayor grado de precisión se podrían mejorar los cálculos lo cual repercutirá en el tratamiento de los datos.

6.3 TRABAJOS FUTUROS

Entendiendo la importancia que tiene la penumbra geométrica dentro de las evaluaciones que se realizan para el análisis de probetas soldadas, se tienen algunos planteamientos de trabajos que se podrían desarrollar a futuro. El primero de estos es el poder trabajar en la influencia que tiene el tamaño de foco de equipos de rayos X o gamma mediante el cálculo de la penumbra geométrica en la evaluación de discontinuidades lineales que se tienen en las radiografías de probetas soldadas. Se lo puede lograr manipulando defectos en probetas soldadas para saber su dimensión y poder estudiarla posteriormente con el uso de las fórmulas correspondientes a la penumbra geométrica. El trabajo es importante ya que mejoraría los cálculos además de dar valores confiables de las medidas obtenidas de las discontinuidades que se puedan estudiar.

Es necesario recordar que es muy posible obtener errores en la medición de discontinuidades si no se tiene un buen manejo de la geometría de los ensayos realizados a probetas y que puede repercutir en tomas erróneas que no darán una medida real para su posterior análisis y reporte final.

Un trabajo que se podría plantear es la determinación de una ecuación teórica-experimental que permita hallar el valor del tamaño de focos de equipos de radiografía industrial en general teniendo en cuenta el desarrollo de ensayos de laboratorio para lograr obtener los datos necesarios y suficientes. Esto es posible debido a que para realizar un ensayo no destructivo por radiografía industrial se tienen geometrías ya definidas y que manejando el comportamiento de las radiaciones ionizantes se puede lograr obtener una ecuación que permita teóricamente determinar el tamaño de foco que un equipo tenga. Para entender mejor la idea se deben realizar tomas radiográficas y mediante la medición de la toma obtenida tanto de los detalles la probeta soldada se puedan generar datos que ayuden finalmente a encontrar un tamaño de foco del equipo sin efectuar el ensayo normalizado "pinhole imaging".

CAPÍTULO 7

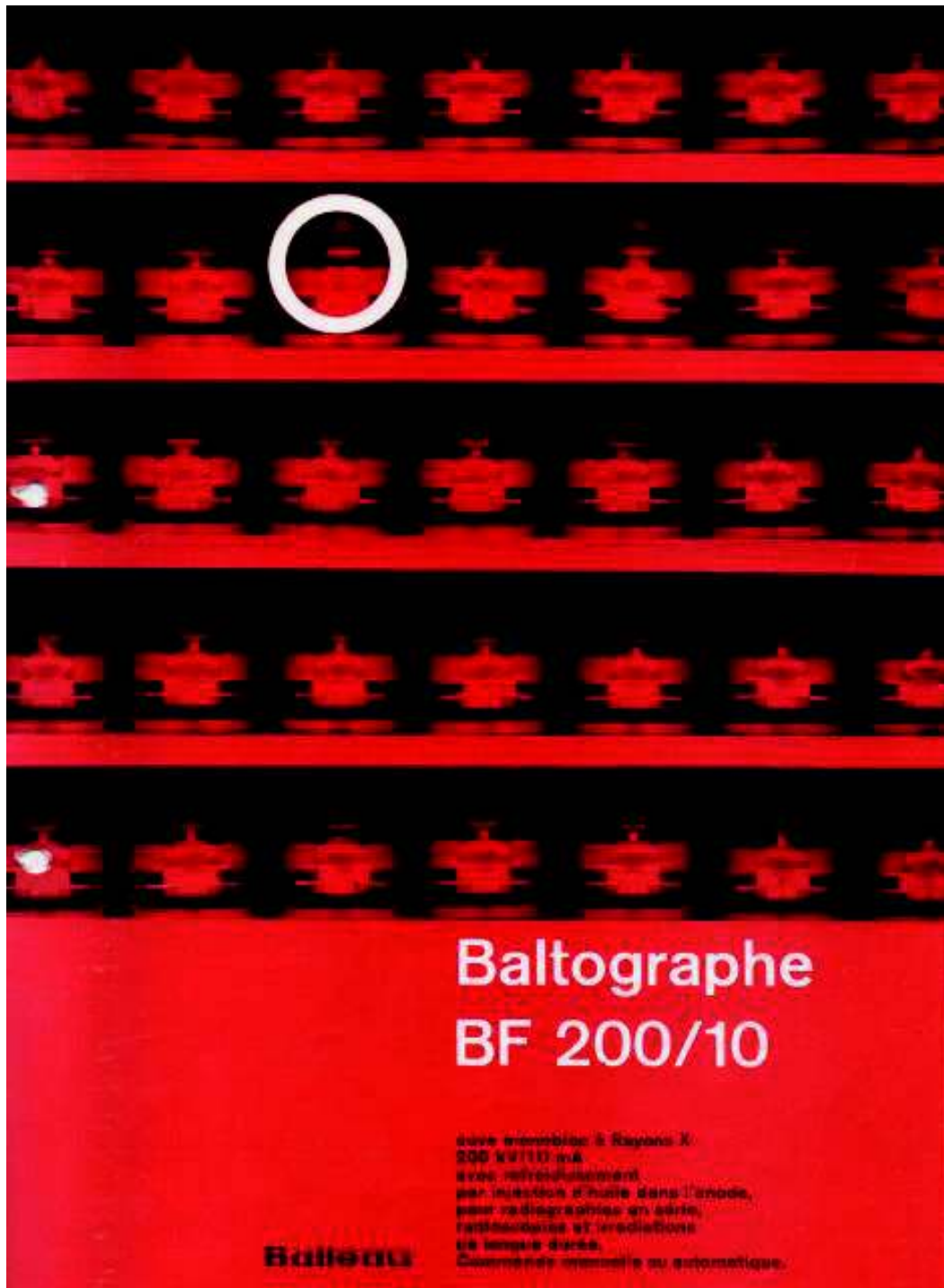
REFERENCIAS

- ASME V. (2010). *“Nondestructive Examination”, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, An International Code*. Retrieved from <https://law.resource.org/pub/us/code/ibr/asme.bpvc.v.2010.pdf>
- ASTM E1165 - 12. (2012). *Standard Test Method for Measurement of Focal Spots of Industrial X-Ray Tubes by Pinhole Imaging*. Retrieved from <http://www.astm.org/Standards/E1000.htm>
- Balteau NDT. (n.d.). *X-Ray Solutions*. Retrieved from <http://www.balteau.com/upload/fichiers/fly-tsc200-0-en-r0.pdf>
- Bavendiek, K., et.al. (2012). New Measurement Methods of Focal Spot Size and Shape of X-ray Tubes in Digital Radiological Applications in Comparison to Current Standards. *18th World Conference on Nondestructive Testing*. Durban, South Africa.
- BS EN 12543-5. (1999). *Non-destructive testing Characteristics of focal spots in industrial X-ray systems for use in non-destructive testing*. Retrieved from <http://www.slideshare.net/AYM1979/be-en-12543-51999-nondestructive-testing-x-ray>
- Ciorau, P. (1990). Critical comments on the use of X-rays and Ir-192 for detecting linear discontinuities. *Elsevier*.
- Deng, Y. S. (1989). Study of geometric imaging in radiography. *Elsevier*.
- Departamento de estadística e Investigación Operativa Universidad de Valencia. (n.d.). *Tabla de la distribución t*. Retrieved from <http://oromeroeii.blogcindario.com/ficheros/t-studentdoscolas.pdf>
- Doyum, A., et al. (1991). A practical and convenient method for the measurement of focal spots of industrial X-ray tubes. *Elsevier*.
- Feaver, M. (1968). The measurement of radiograph image quality. *Elsevier*.
- Gambaccini, M., et al. (2011). Measurement of focal spot size in a 5.5 MeV linac. *Elsevier*.

- GE Inspection Technologies. (2007). *Industrial Radiography. Image forming techniques*. Retrieved from http://www.ge-mcs.com/download/x-ray/GEIT-30158EN_industrial-radiography-image-forming-techniques.pdf
- Hellier, C. (1976). *Handbook of Nondestructive Evaluation*.
- Kodak. (1980). *Radiography in Modern Industry*. Retrieved from <http://www.kodak.com/eknec/documents/87/0900688a802b3c87/Radiography-in-Modern-Industry.pdf>
- Madsen, J. (1989). Focal spot size measurements for microfocus X-ray sets. *Elsevier*.
- NDT Resource Center. (2001-2014). *Geometric Unsharpness*. Retrieved Diciembre 28, 2015, from https://www.nde-ed.org/index_flash.htm
- Oliveira, A. D., et al. (2015). The determination of the focal spot size of an X-ray tube from the radiation beam profile. *Elsevier*.
- Salamon, M., et al. (2008). Comparison of different methods for determining the size of a focal spot of microfocus X-ray tubes. *Elsevier*.
- Sathe, D.B., et al. (2007). A practical method to evaluate radiographic unsharpness. *Elsevier*.

ANEXOS

ANEXO 1: MANUAL DEL EQUIPO DE RAYOS X



ANEXO 1: MANUAL DEL EQUIPO DE RAYOS X

Continuación

La page de couverture a été réalisée à partir d'un cliché radiographique c/s à l'amabilité des Poudreries Reunies de Belgique, Bruxelles.

Baltographe BF 200/10

cuve monobloc pour service très dur

Cuve en tôle soudée et renforcée.

Isolément interne : huile.

Pompe puissante incorporée, injectant l'huile de refroidissement dans la tige d'anode du tube.

Echangeur interne de grande surface pour refroidissement de l'huile par circulation d'eau.

Thermosats et **thermocontacts** de sécurité.

Ecrans internes anti-X conformes aux normes NBN - DIN - NF - ASA - Suisse, etc.

Dispositif interne de réduction de l'onde inverse.

Fonctionnement en toutes positions et sous tous climats.

Berceau de protection enveloppant la cuve.

Suspension élastique du tube dans la cuve et de la cuve dans le berceau antichocs.

Choix de supports simples mais pratiques.

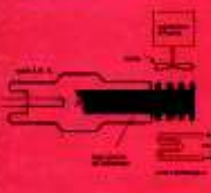
Adaptation facile à tout autre support, grâce au berceau et aux tourillons.

Câbles d'allonge permettant de porter jusqu'à 100 m la distance cuve-valise de commande.

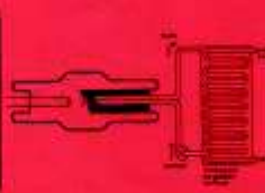
Poids sans berceau 79 kg, avec berceau 86 kg.

principes de refroidissement du tube à Rayons X

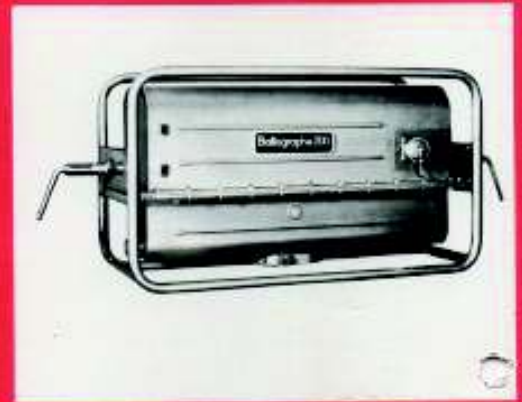
I pour fonctionnement
intensifié



II pour haute productivité



Le Baltographe BF 200/10 est quel autre système portable «automatique» en 1950. La chambre X¹ stabilisée le refroidissement du tube dans un berceau à huile. Dans la cuve renforcée BF 200/10, il est relié au tube par une tige X¹. Le tube refroidisseur est équipé d'un échangeur interne pour les gros appareils à 100 kV. Le BF 200/10 est relié à un transformateur de 200 kV par un câble de 100 m. Le BF 200/10, est équipé en outre des accessoires de sécurité, régulation, sécurité de l'émission de X¹.



valise de commande perfectionnée

Coffret métallique étanche à l'eau et aux poussières.

Interrupteur général par clé de contact, voyant vert.

Minuterie électrique 0 - 5 min. à réarmement automatique.

Régime continu de la H. T. : kV/mètre 0-200 kV.

Voyant rouge clignotant, indiquant l'émission de R. X.

Prise basse pour connexion « Automatis », « Clignotis », contact à distance, pédale, minuterie extérieure, etc.

Régime continu du débit: mA/mètre 0-20 mA.

Stabilisateur de débit, avec switch de mise hors circuit si la fréquence est instable (groupe électrogène) ou incorrecte.

Sécurité surtension : coupe l'émission d'X et éteint les clignotants rouges; reenclenchement immédiat autorisé.

Sécurité échauffement : allume en plus un voyant jaune; il n'est pas possible de reenclencher avant extinction.

Totalisateur de fonctionnement incorporé.

Éléments internes tropicalisés, fusibles apparents.

Tables de pose et mode d'emploi: cadrans éclairés (34 kg)

Balteau

ANEXO 1: MANUAL DEL EQUIPO DE RAYOS X

Continuación

domaines d'utilisation

Le BF 200/10 a été conçu, réalisé et éprouvé en vue des applications à poste fixe ou semi-fixe, pour fonctionner sans risques à cadence très élevée en contrôles radiographiques et radioscopiques, ou en continu pour les irradiations de longue durée. La très faible filtration inhérente autorise le contrôle de faibles épaisseurs de matériaux peu absorbants. À temps de pose égal, le BF 200/10 réalise à 155 kV la pénétration d'un poste 150 kV / 10 mA à tension constante et câble H. T. ; à 180 kV, il égale un 150 kV/20 mA, de même type ; à 200 kV, le gain est de 10 à 15 mm Fe. Les qualités d'image obtenues sont équivalentes au point que la distinction des clichés n'est pas possible.

et pour les opérations en série...

Pédale de commande à distance, avec enclenchement en charge jusqu'à 150 kV/10 mA (2,4 kg).
Automatik : par la seule manœuvre - presser le bouton de la minuterie -, l'Automatik établit progressivement la HT en 10 sec et reproduit exactement les réglages du précédent cliché : HT, débit et temps de pose, puis se réarme en 10 sec (21 kg).

ou pour les irradiations très brèves ou très longues...

Minuterie extérieure synchrone à 3 gammes : 2,4 à 60 sec., 24 sec. à 10 min., 4 à 100 min., avec totalisateur du temps de fonctionnement.

caractéristiques techniques

Alimentation réseau 10 A - 50 Hz (60 Hz sur demande) monophasé + terre, 220 V (200-240 V) - 2500 VA.
H. T. minimum utile : 40 kV
H. T. maximum : 200 kV réels à 10 mA.
Compensation de la chute de tension en charge.
Débit stabilisé réglable jusqu'à 10 mA.
Foyer : 3,2 x 3,2 mm.
Ouverture du faisceau 40°
Fonctionnement ininterrompu à 200 kV/10 mA : sans circulation d'eau : 1/2 heure avec circulation d'eau : illimité
Pénétration : mm Fe, écrans Pb, FF = 200 mm, N = 1

durée de pose en sec.	1	5	15
film à grain fin (D 10 et équivalent)	35	47	55
film à grain très fin (D 7 et équivalent)	25	37	44

en réglant sur échelle de 1 : 3 : 5 mm
ou utilisant le calculateur N : 1, 3, 5 : 2,5

Intensité du rayonnement pour 200 kV/10 mA à 50 cm du foyer : 70 r/min., au fond du cône de la fenêtre, à 7 cm du foyer : 3500 r/min.
Filtration inhérente totale 4,5 mm Al.
Première couche de demi-atténuation CDA : 0,14 mm Cu (4,5 mm Al).

illustrations

1. Cuvette transport BF 200/10
2. Unité de commande V4 et 21 kg
3. Pédale synchrone de 2,4 kg
4. Automatik
5. Minuterie extérieure à 2 kg
6. Un des deux batteries de 2 postes 200 kV de S. A. L'ORANGE-CAGALY, Sures - France.
7. Cuvette BF 200/10 sur chariot à 200 kg avec commande synchrone et pédale de 2,4 kg



ANEXO 1: MANUAL DEL EQUIPO DE RAYOS X

Continuación

8

9

10

11

12

spécifications

Appareil BF 200/10 standard

BF 200/a-b	Cuve avec berceau à suspension élastique.
AX/c-d	Dispositif de centrage télescopique, escamotable.
V 4/a-g-h-m	Valise de commande (français-anglais).
V 4/a-g-h-n	Valise de commande (allemand-espagnol).
A 4/a-b-d-g	Valise pour accessoires.
A 4/d	Prise-base réseau.
A 4/a	Câble réseau 10 m.
A 4/b	Câble valise-cuve 10 m.

compléments facultatifs

AX/a	Paire de tourillons pour tous supports.
SX/b	Chevalet démontable, sans roulettes.
SX/c	Embase démontable pour SX/b.
A 200/a	Diable semi-démontable.
A 200/b	Fourche pivotante.
SX/e	Girafe hydraulique.
A 4/h	Autotransfo monté dans la valise A 4/g, 110-130 180-220-250-380-440/220 V, 50-60 Hz.
A 4/c	Câble d'allonge valise-cuve, 10 m (max. 9).
A 4/k	Automatix.
A 4/e	Dig notix.
A 4/f	Répétiteur de Cignolix.
A 4/n	Pédale de commande à distance.
V 4/c	Enclenchement brusque jusqu'à 130 kV.
A 4/m	Minuterie extérieure 2,4 sec. à 100 min.
AX/o	Centreur lumineux.

éléments de rechange

AX/d	Centreur télescopique pour AX/c-d
A 4/a	Câble réseau 10 m.
A 4/b	Câble valise-cuve 10 m.
A 4/c	Câble d'allonge valise-cuve, 10 m.

illustrations

8. Girafe SX/e avec fourche à 200/b
Roues de 150 mm hauteur max, 3,25 m diamètre, largeur hors tout 800 mm (400 kg). Centreur télescopique rétracté.

9. Appareil complet sur diable démontable A 200/a
Le cadre du diable se relie pour la prise de clichés sur le sol.

10. Chevalet SX/b monté sur embase à roulettes SX/c avec centreur lumineux AX/o

11. Valise à accessoires A 4/g avec autotransformateur A 4/h incorporé.

12. Cignolix A 4/e et répétiteur A 4/f pour baliser la zone dangereuse.

Balteau

rue de Serbie, LIEGE (Belgique)
tél. : (04) 52.70.70
télég. : TRANSFO-LIEGE
téléc. : BALTEAU-LIEGE 04.268

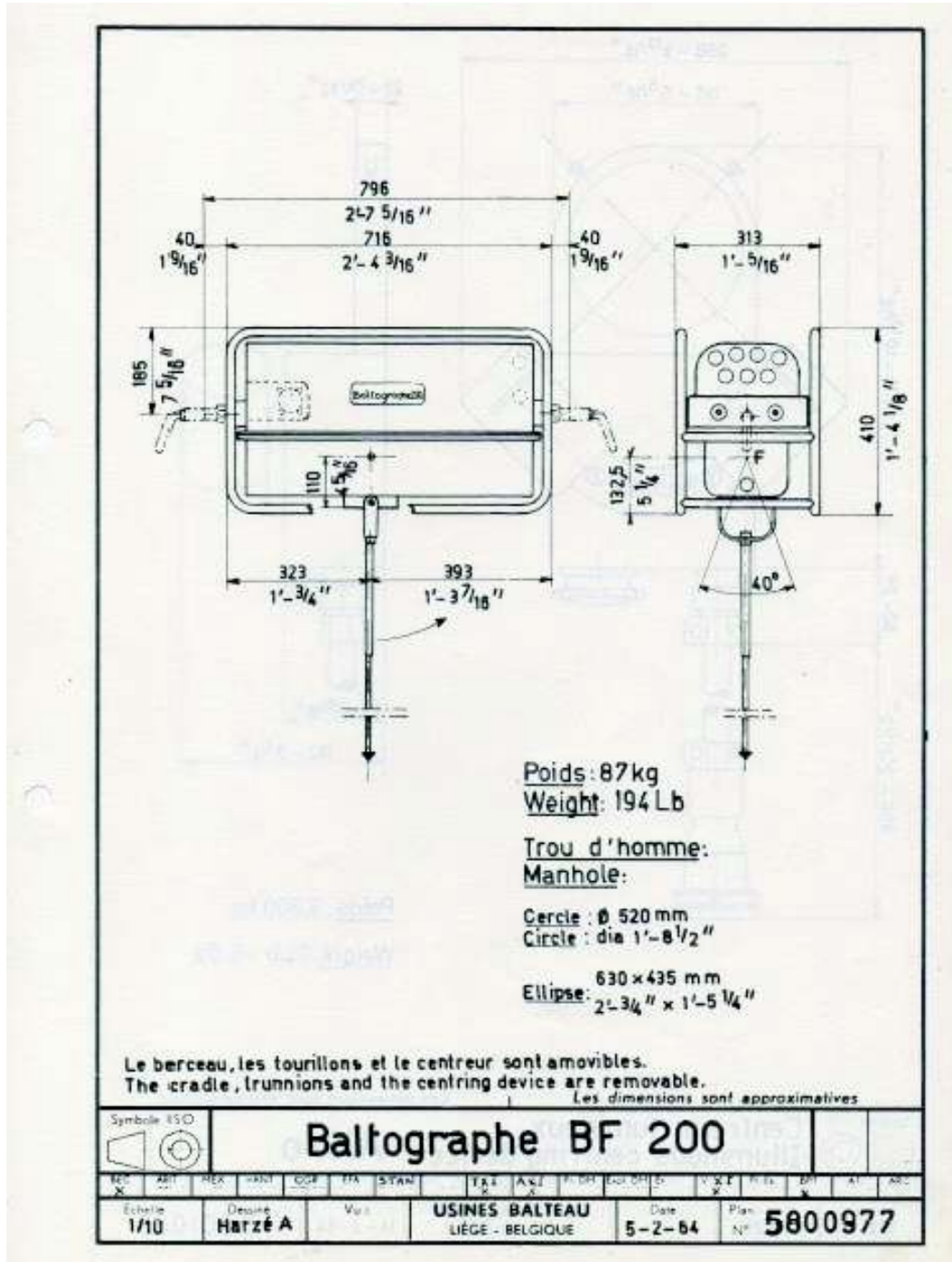
BF 200/10 1 - F

Tous droits de modification réservés

Imprimé en Belgique

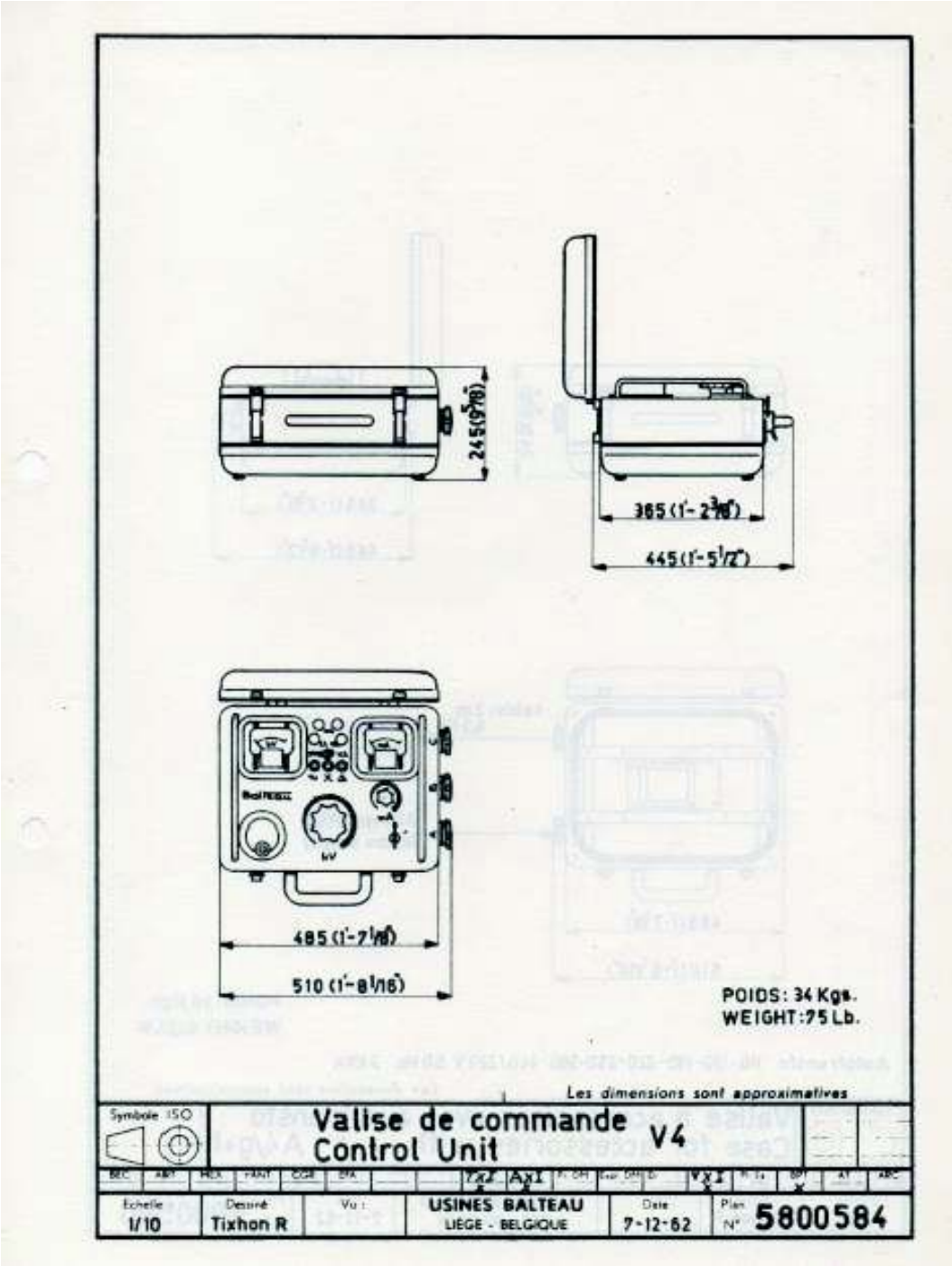
ANEXO 1: MANUAL DEL EQUIPO DE RAYOS X

Continuación



ANEXO 1: MANUAL DEL EQUIPO DE RAYOS X

Continuación



ANEXO 2: ENSAYO POR ABSORCIÓN ATÓMICA



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA



RESULTADO DE ANALISIS

Solicitante: Mauricio Cely
Referencia: RM - 8483
Fecha: 02-03-16
Muestra: Una muestra de virutas de plomo
 Focal Spot Material
Método: Absorción Atómica (solo lecturas)

Nombre	Determinación	Resultados
Virutas de plomo	Plomo	98,77%

NOTA: La Espectrometría de Absorción Atómica es una técnica especialmente usada para concentraciones bajas. Para concentraciones altas dicha técnica, puede tener un error de hasta el 2%.


 Ing. Ernesto de la Torre Ch. PhD.
 Jefe de Departamento




 MSc. Evelyn Criollo T.
 Jefe de Laboratorio

ANEXO 3: CURVA DE POTENCIA DEL EQUIPO

BALTOGRAPH TSC200/0

Load curve



SMALL FOCAL

Load curves are indicative as they display the theoretical capacity of the target that may be modified by the HV generator connected and/or by user's settings. Please consult our engineers for up to date information and data related to your generator.

STANDARD EQUIPMENT

Part designation
Fitting for water hose connections d=8 and d=12 mm

OPTIONAL ACCESSORIES

Part designation

- Quick flanges with key
- Tube accessories support
- Lead diaphragm
- Four legs stand

Contact details

Balteau NDT
Rue Voie de Liège, 12
B-4681 Hermalle Sous Argenteau
Belgium

www.balteau.com
balteau@balteau.com
Tel. +32 (0) 4 374 75 75
Fax +32 (0) 4 374 75 85

Distributed by:

BALTOGRAPH TSC200/0

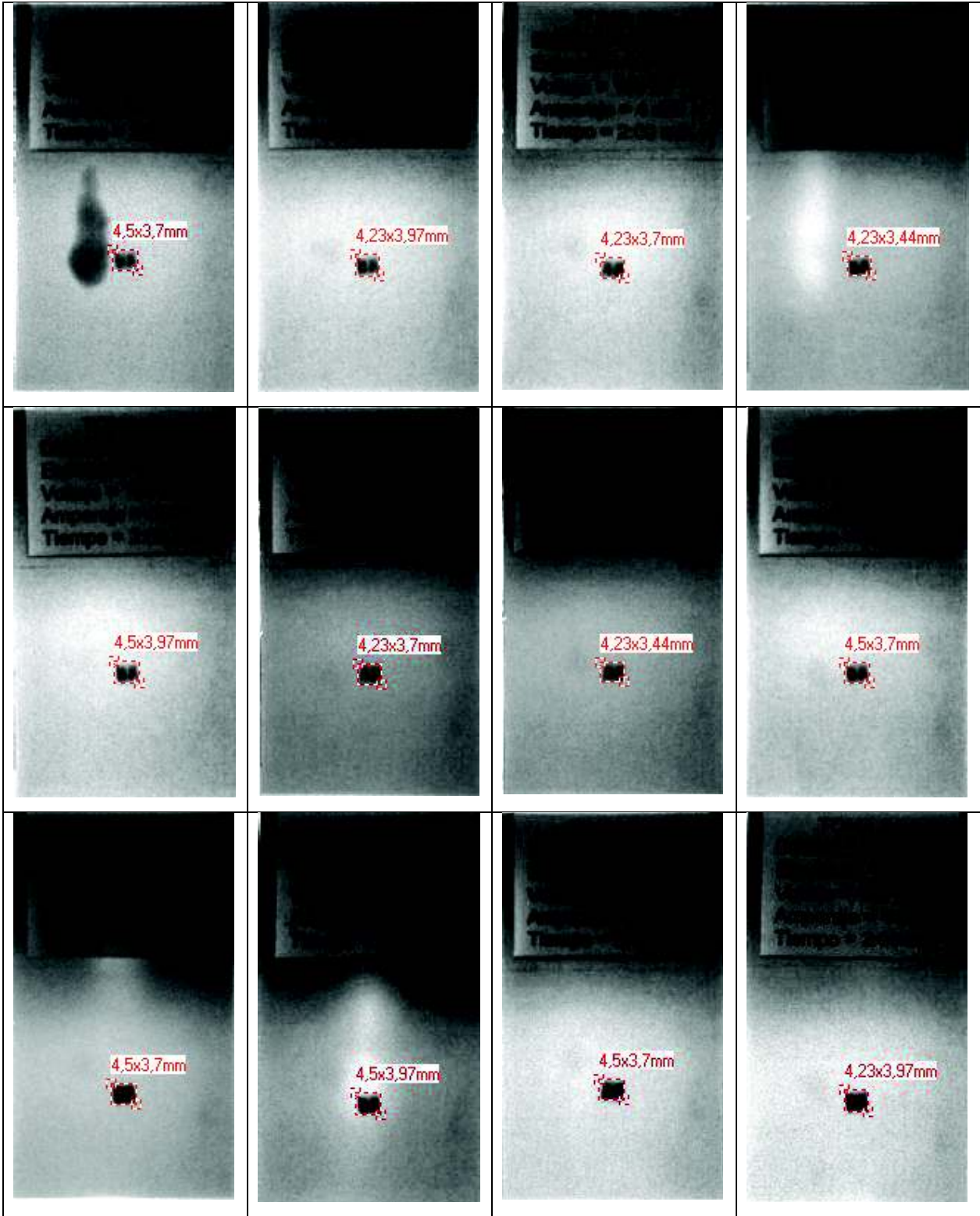
All specifications are non contractual and are subject to change without prior notice.

ANEXO 4: MEDIDAS TAMAÑO DE FOCO (70 TOMAS)



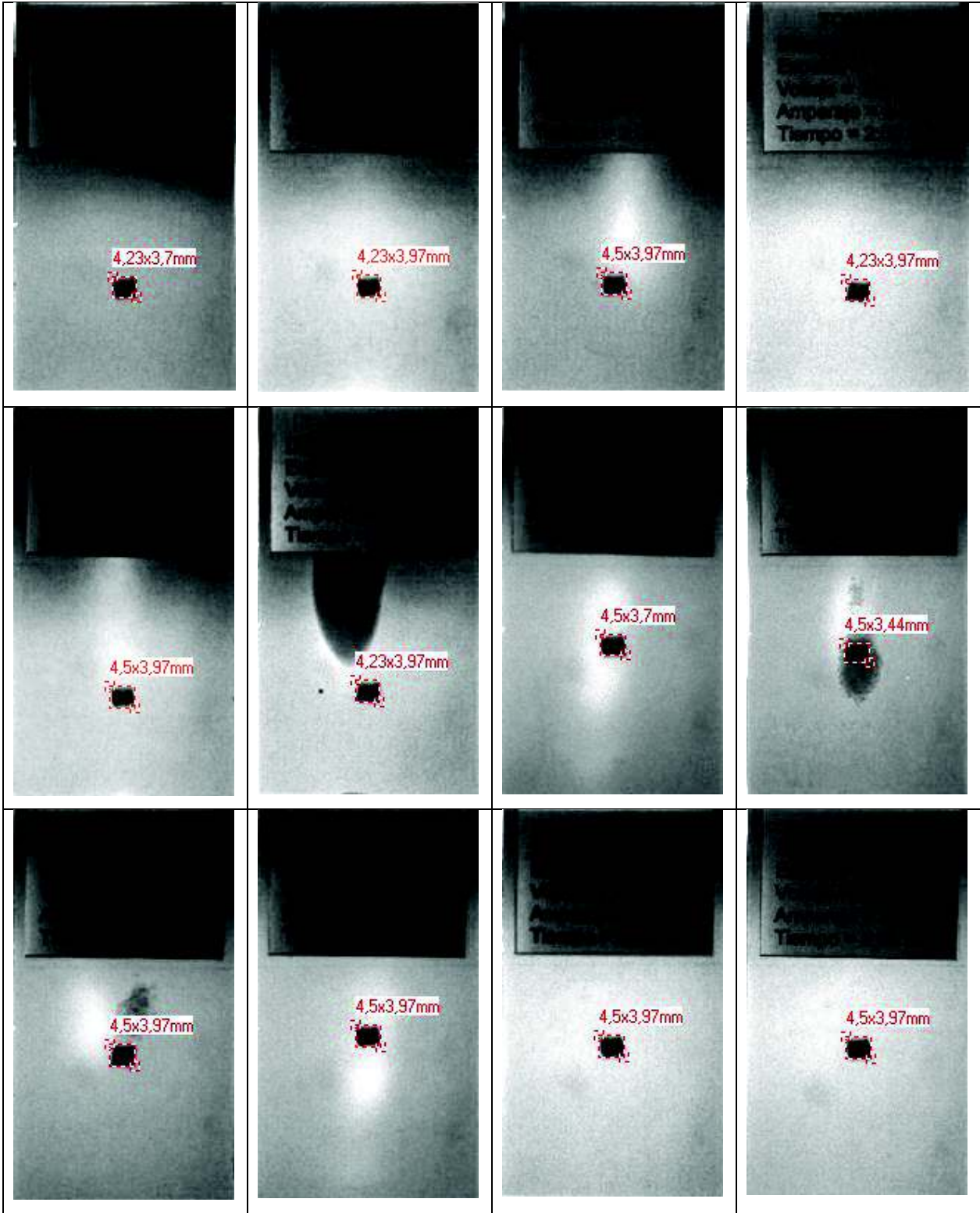
ANEXO 4: MEDIDAS TAMAÑO DE FOCO (70 TOMAS)

Continuación



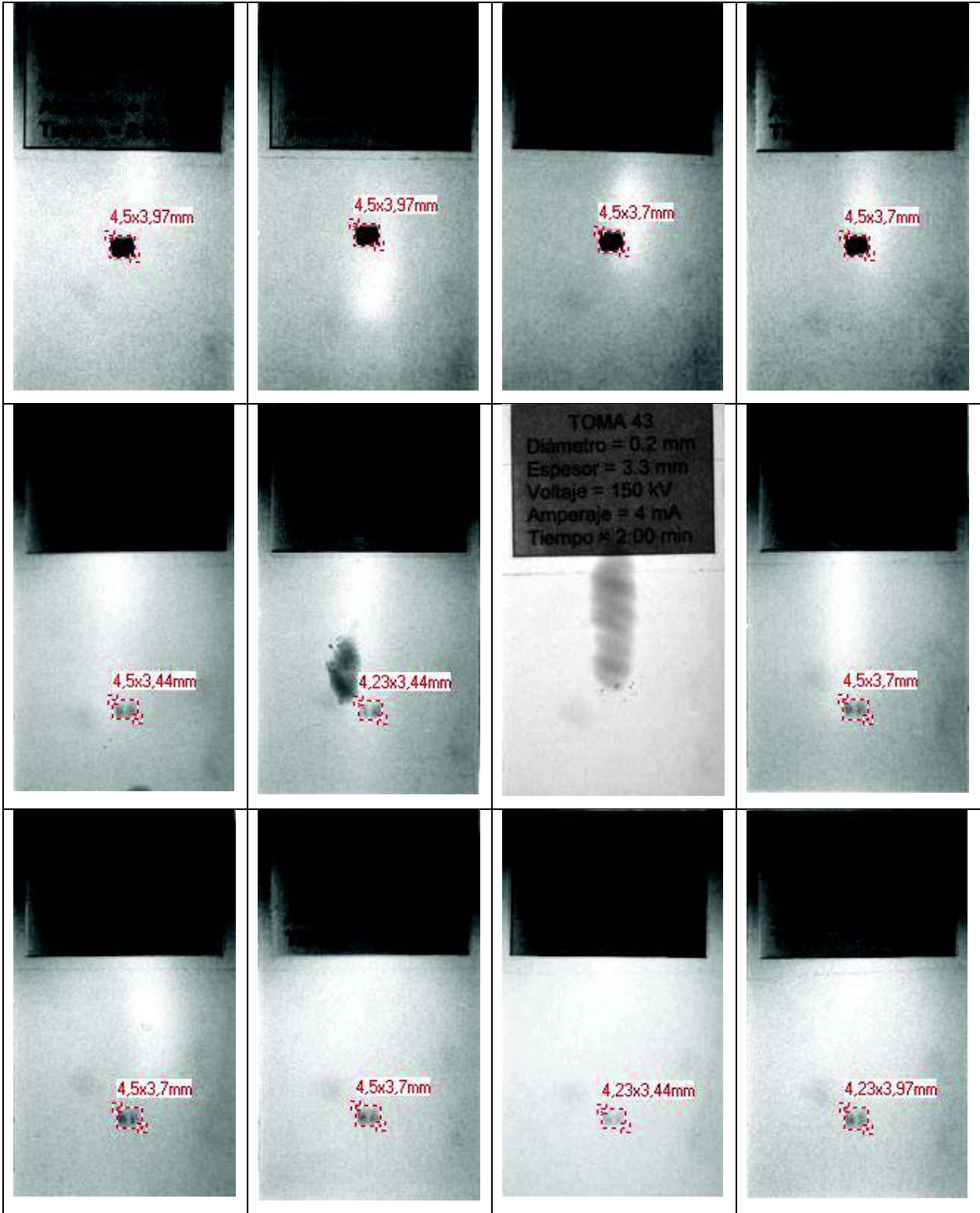
ANEXO 4: MEDIDAS TAMAÑO DE FOCO (70 TOMAS)

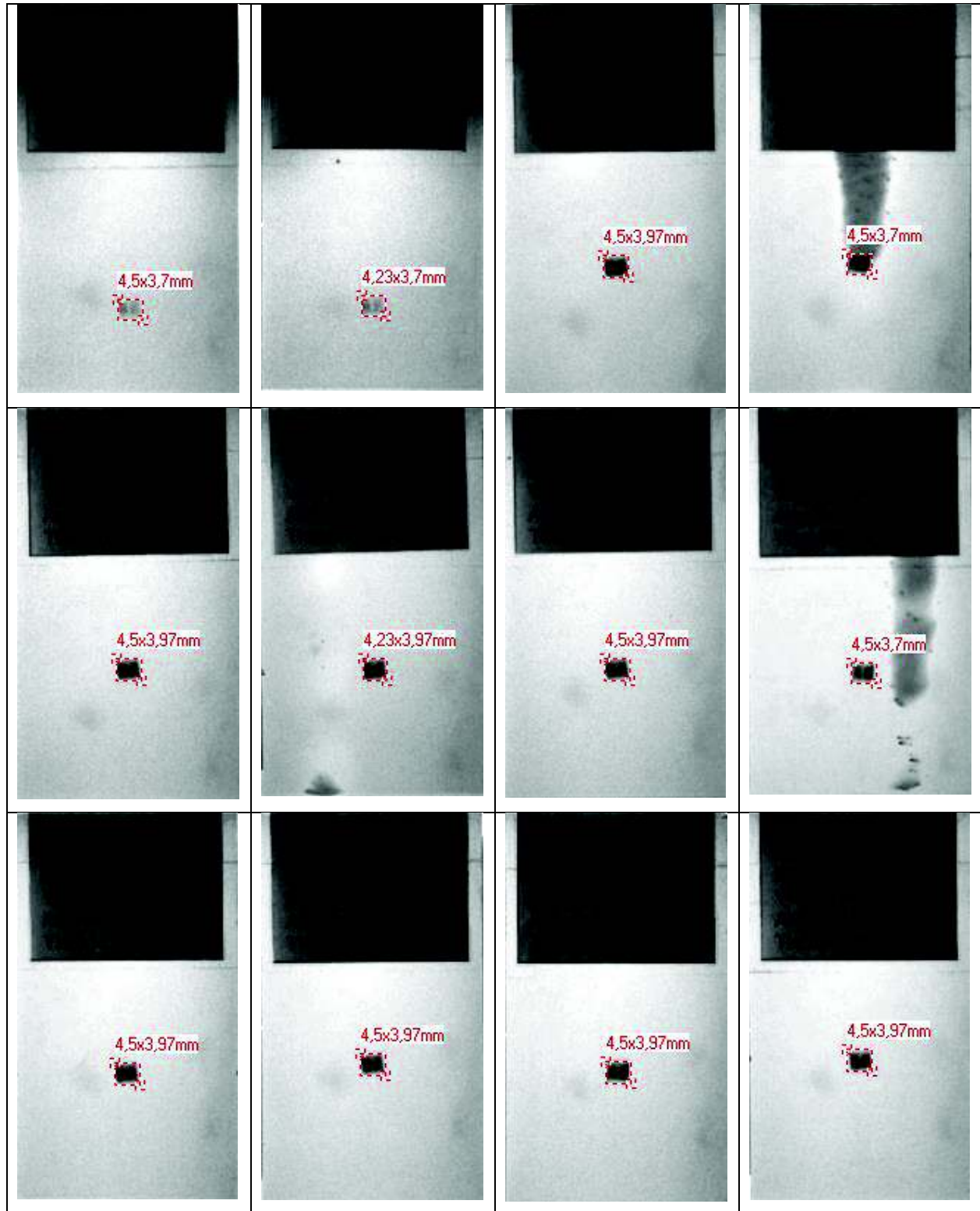
Continuación



ANEXO 4: MEDIDAS TAMAÑO DE FOCO (70 TOMAS)



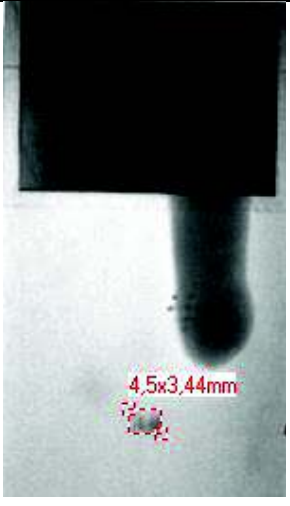
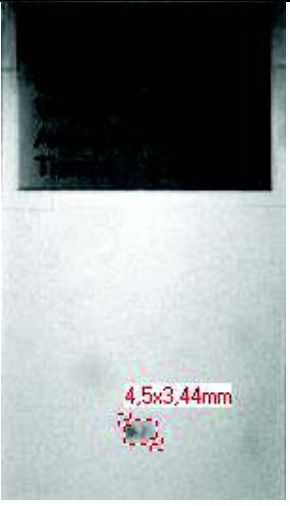
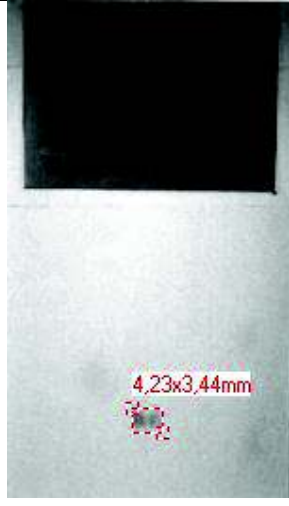
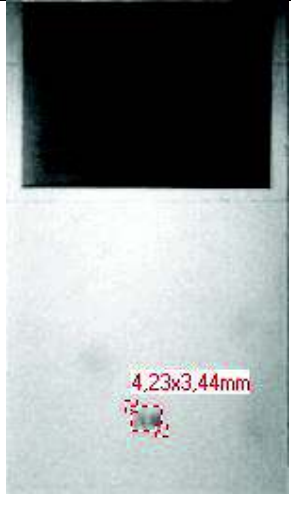




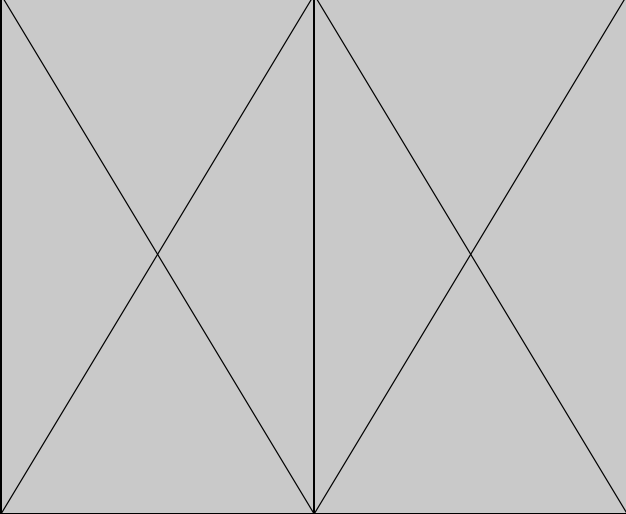
Continuación



ANEXO 4: MEDIDAS TAMAÑO DE FOCO (70 TOMAS)*Continuación*

ANEXO 4: MEDIDAS TAMAÑO DE FOCO (70 TOMAS)

Continuación

 <p>4,5x3,7mm</p>	 <p>4,5x3,44mm</p>	 <p>4,5x3,44mm</p>	 <p>4,5x3,44mm</p>
 <p>4,23x3,44mm</p>	 <p>4,23x3,44mm</p>	 <p>4,23x3,44mm</p>	 <p>4,5x3,7mm</p>
 <p>4,23x3,44mm</p>	 <p>4,5x3,7mm</p>		

ANEXO 5: REGISTRO DE ENSAYOS REALIZADOS



REGISTRO DE OPERACIONES

EQUIPO DE RAYOS X

FECHA (dd/mm/aa)	HORA DE INICIO	HORA DE FINALIZACIÓN	RESPONSABLE (Nombre y Firma)
29/08/2015	10h30	12h30	Mauricio Cely
31/08/2015	10h30	12h30	Mauricio Cely
01/09/2015	10h30	12h30	Mauricio Cely
11/09/2015	11h00	11h30	Mauricio Cely
17/09/2015	2h00	2h30	Mauricio Cely
23/09/2015	3h00	3h30	Mauricio Cely
01/10/2015	11h45	12h00	Mauricio Cely
15/10/2015	7h00	7h30	Mauricio Cely
10/11/2015	10h00	11h00	Mauricio Cely
13/11/2015	10h00	11h00	Mauricio Cely
16/11/2015	9h00	10h00	Mauricio Cely
18/11/2015	7:45h00	8h00	Mauricio Cely
24/11/2015	14:30h00	15:00	Mauricio Cely
25/11/2015	16:00	16:30	Mauricio Cely
17/12/2015	7:00	9:00	Mauricio Cely
21/12/2015	11:00	12:00	Mauricio Cely
07/01/2016	11:00	12:00	Mauricio Cely

ANEXO 5: REGISTRO DE ENSAYOS REALIZADOS

Continuación



ESCUELA
POLITÉCNICA
NACIONAL



REGISTRO DE OPERACIONES

EQUIPO DE RAYOS X

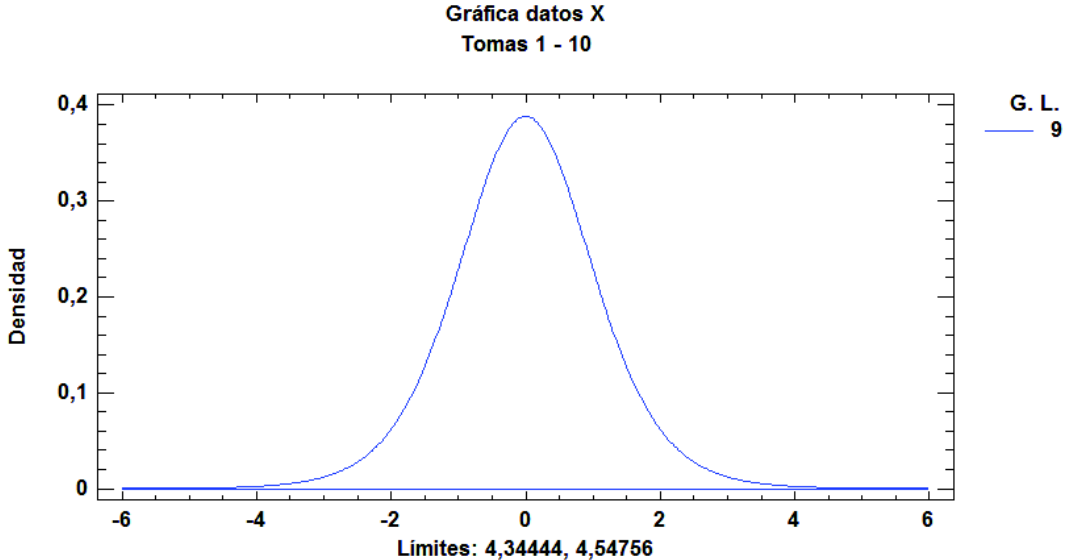
FECHA (dd/mm/aa)	HORA DE INICIO	HORA DE FINALIZACIÓN	RESPONSABLE (Nombre y Firma)	
19/01/2016	9:30 H	10:00 H	Mauricio Cely	TESIS
20/01/2016	7:00 H	8:30 H	Mauricio Cely	TESIS
22/01/2016	8:00 H	9:00 H	Mauricio Cely	TESIS
25/01/2016	8:00 H	8:30 H	Mauricio Cely	TESIS
26/01/2016	8:30 H	9:00 H	Mauricio Cely	
27/01/2016	8:00 H	8:30 H	M. Cely / V. Sotomayor	
01/02/2016	15:00 H	16:00 H	Mauricio Cely	TESIS
02/02/2016	11:00 H	13:00 H	Vladimir Sotomayor / Mauricio Cely	
23/02/2016	10:30 H	11:30 H	Mauricio Cely	TESIS
23/02/2016	12:00 H	13:00 H	M. Cely / V. Sotomayor	
24/02/2016	7:30 H	10:00 H	Mauricio Cely	TESIS
24/02/2016	13:00 H	16:00 H	Mauricio Cely	TESIS
05/02/2016	8:00 H	9:30 H	Mauricio Cely	TESIS
25/02/2016	9:30 H	13:00 H	Mauricio Cely	TESIS
26/02/2016	10:00 H	10:30 H	Vladimir Sotomayor / Mauricio Cely	
26/02/2016	11:00 H	11:30 H	Mauricio Cely	
29/02/2016	11:00 H	11:30 H	Vladimir Sotomayor / Mauricio Cely	

ANEXO 6: VALORES T PARA UNA ÁREA DE DOS COLAS

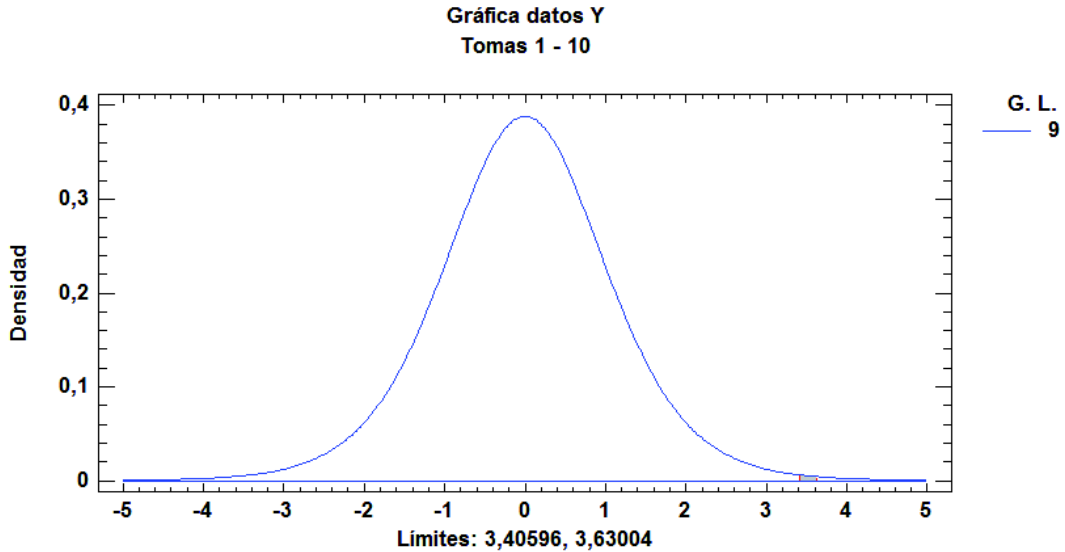
gl	ÁREA DE DOS COLAS						
	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01	0,001	0,0001
1	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657	636,619	6366,198
2	1,886	2,920	4,303	6,695	9,925	31,598	99,992
3	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	12,924	28,000
4	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	8,610	15,544
5	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	6,869	11,178
6	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,959	9,082
7	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	5,408	7,885
8	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	5,041	7,120
9	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,781	6,594
10	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,587	6,211
11	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,437	5,921
12	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	4,318	5,694
13	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	4,221	5,513
14	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	4,140	5,363
15	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	4,073	5,239
16	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	4,015	5,134
17	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,965	5,044
18	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,922	4,966
19	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,883	4,897
20	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,850	4,837
21	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,819	4,784
22	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,792	4,736
23	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,767	4,693
24	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,745	4,654
25	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,725	4,619
26	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,707	4,587
27	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,690	4,558
28	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,674	4,530
29	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,659	4,506
30	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,646	4,482
40	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	3,551	4,321
60	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	3,460	4,169
100	1,290	1,660	1,984	2,364	2,626	3,390	4,053
140	1,288	1,656	1,977	2,353	2,611	3,361	4,006
∞	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	3,291	3,891

ANEXO 7: GRÁFICAS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Gráfica de los datos del foco en X de las tomas 1 a la 10



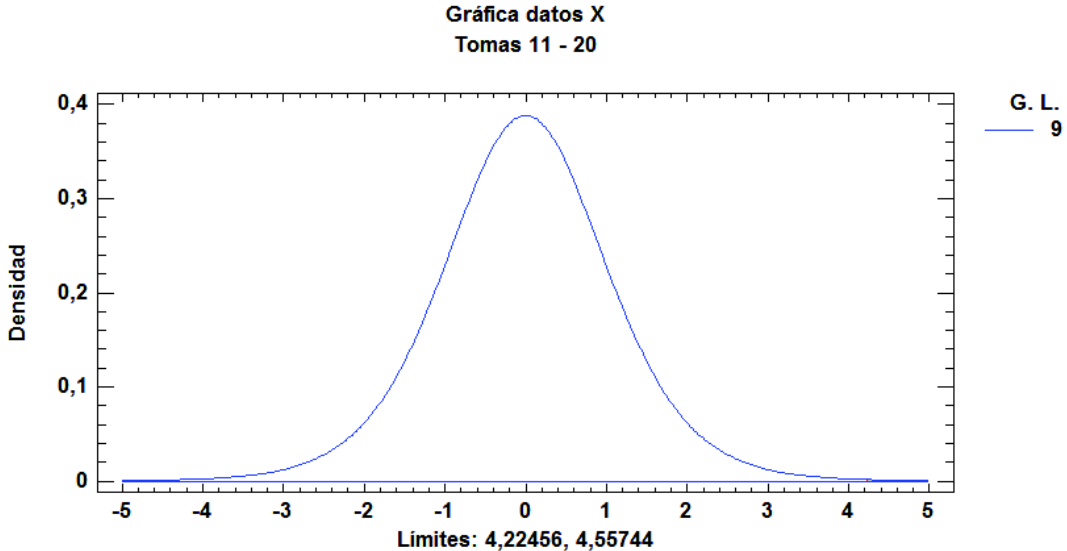
Gráfica de los datos del foco en Y de las tomas 1 a la 10



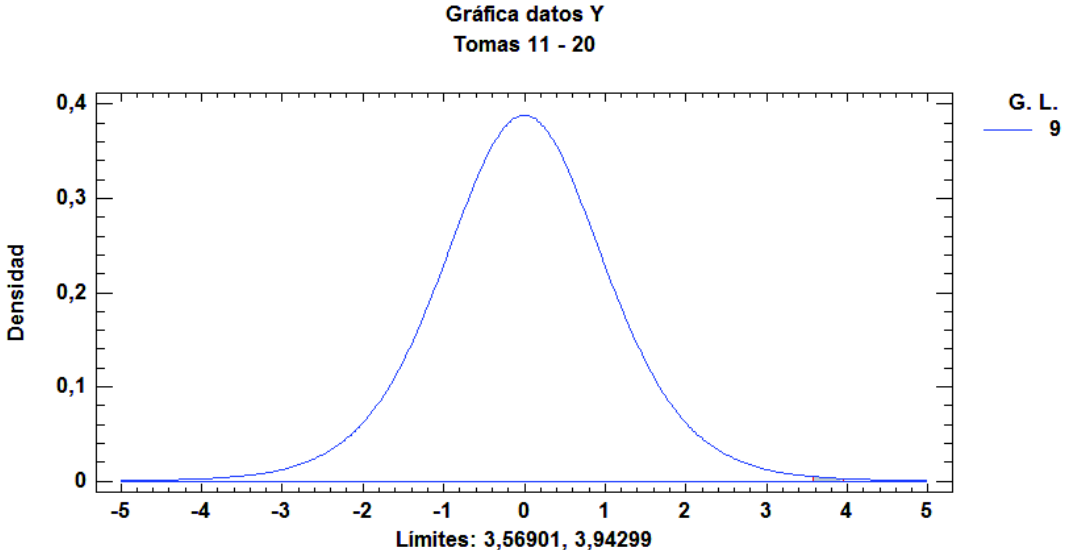
ANEXO 7: GRÁFICAS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Continuación

Gráfica de los datos del foco en X de las tomas 11 a la 20



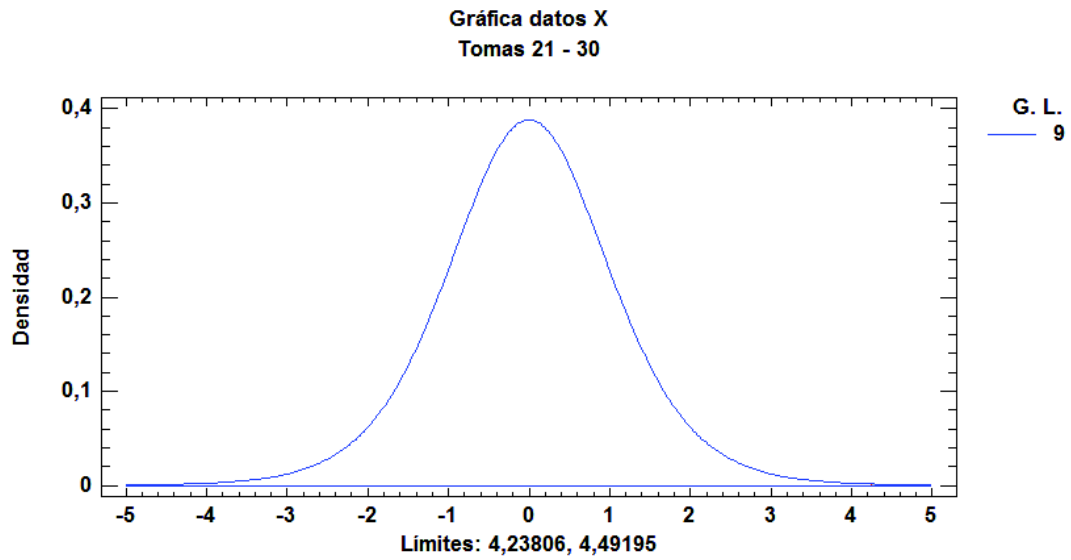
Gráfica de los datos del foco en Y de las tomas 11 a la 20



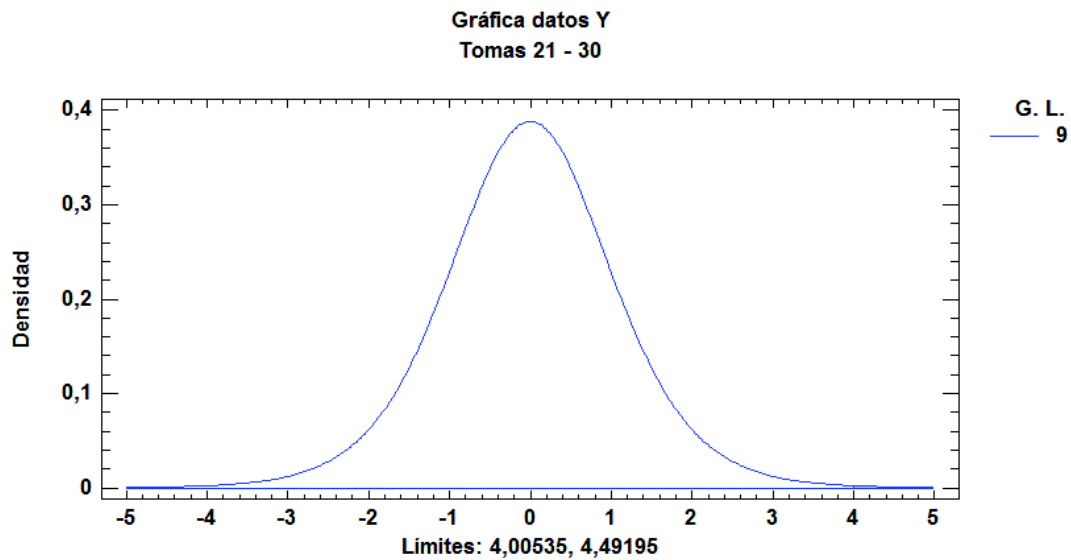
ANEXO 7: GRÁFICAS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Continuación

Gráfica de los datos del foco en X de las tomas 21 a la 30



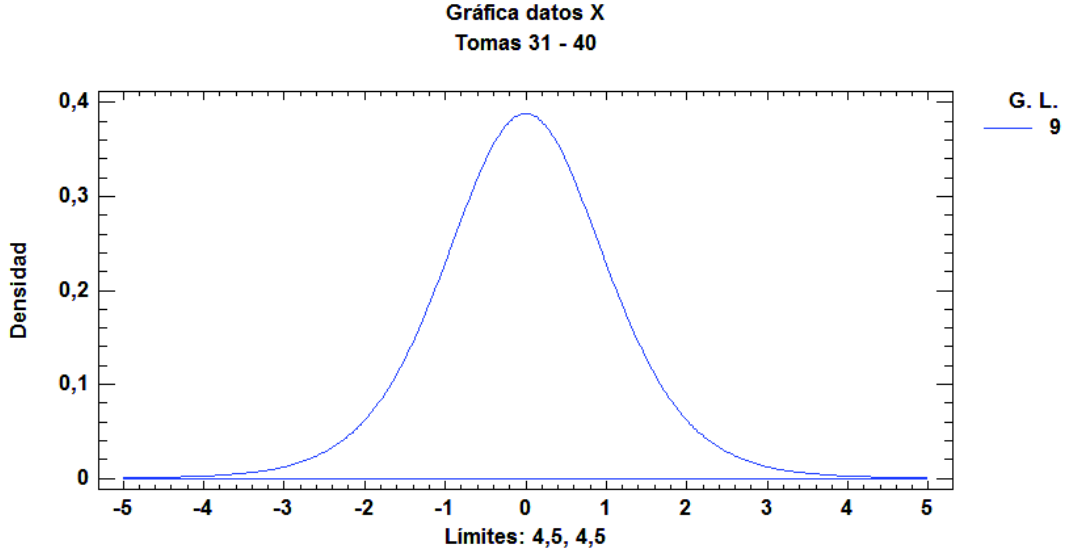
Gráfica de los datos del foco en Y de las tomas 21 a la 30



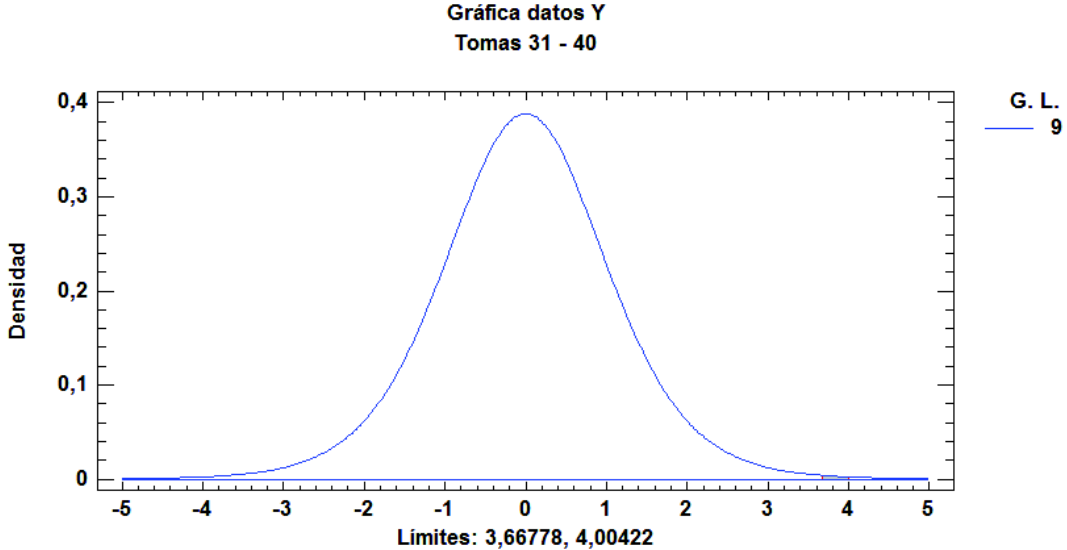
ANEXO 7: GRÁFICAS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Continuación

Gráfica de los datos del foco en X de las tomas 31 a la 40



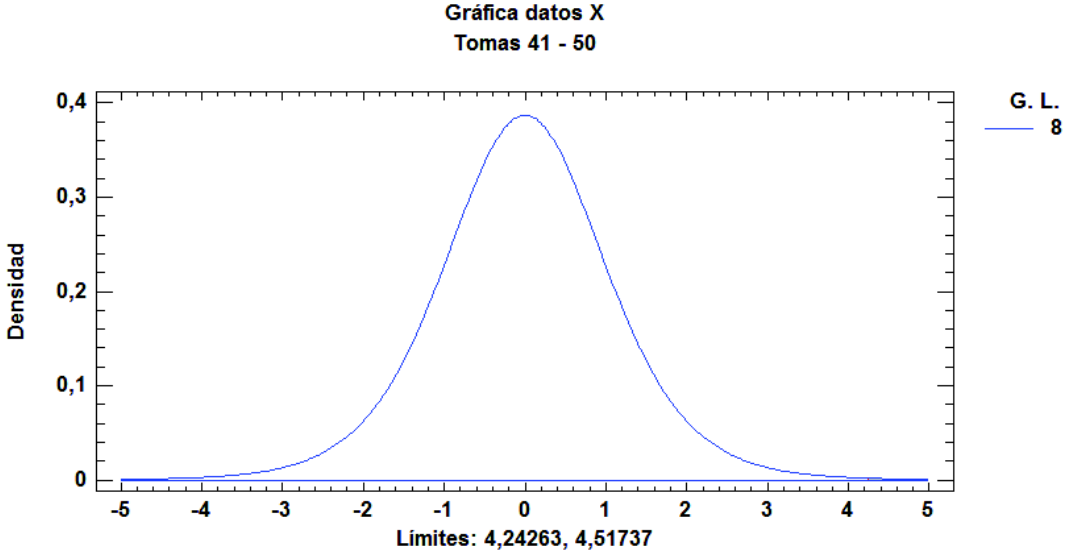
Gráfica de los datos del foco en Y de las tomas 31 a la 40



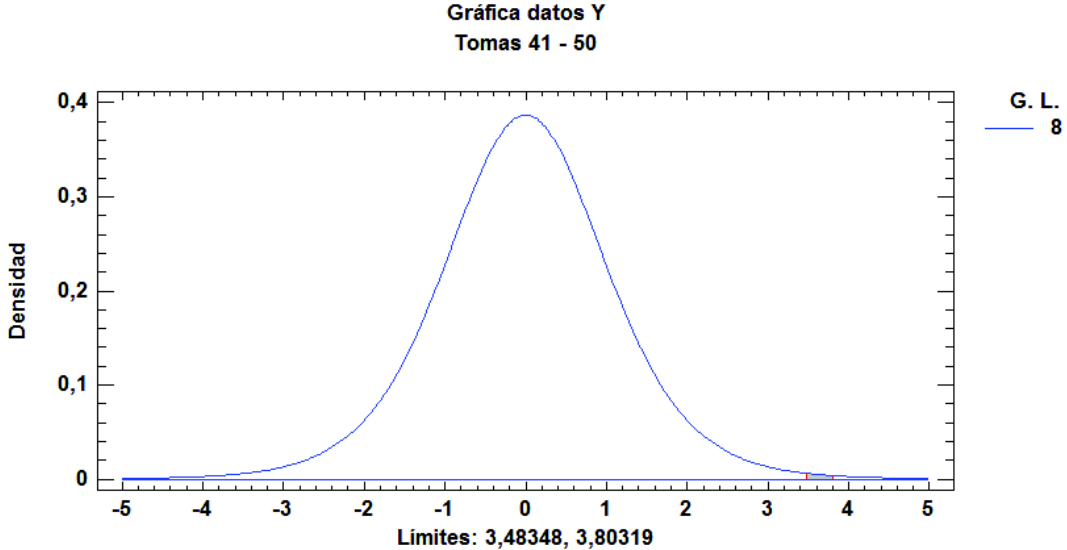
ANEXO 7: GRÁFICAS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Continuación

Gráfica de los datos del foco en X de las tomas 41 a la 50



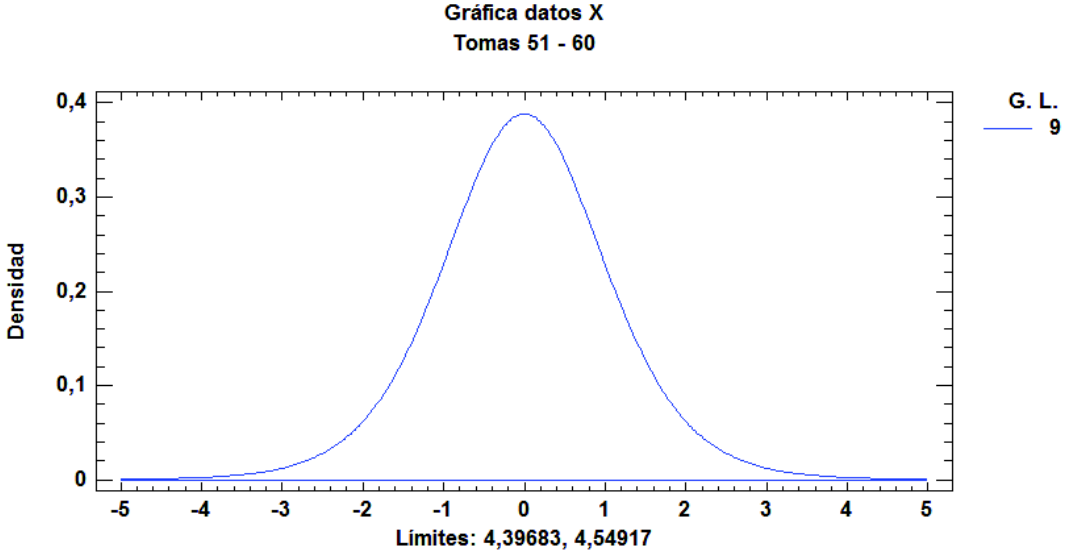
Gráfica de los datos del foco en Y de las tomas 41 a la 50



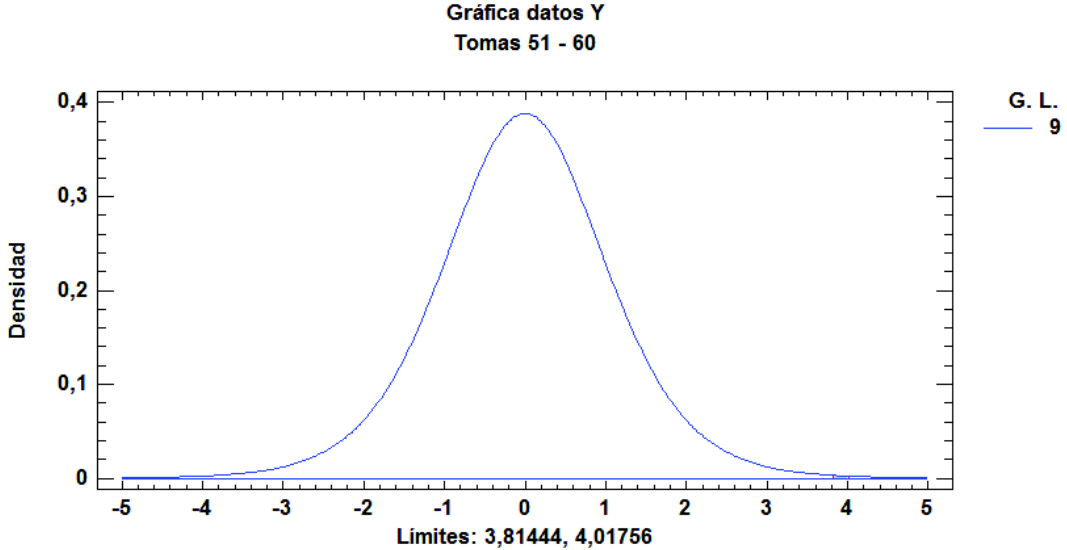
ANEXO 7: GRÁFICAS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Continuación

Gráfica de los datos del foco en X de las tomas 51 a la 60



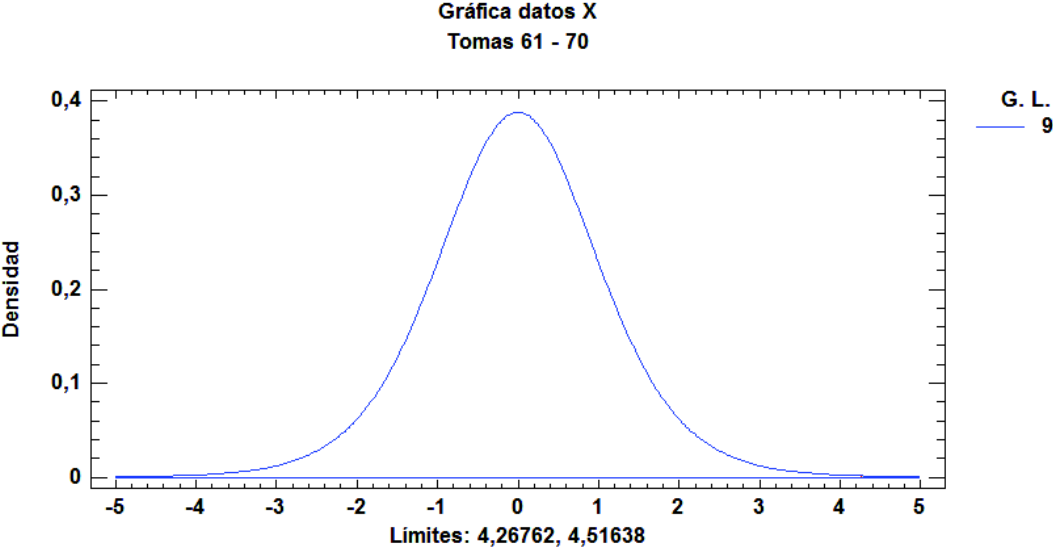
Gráfica de los datos del foco en Y de las tomas 51 a la 60



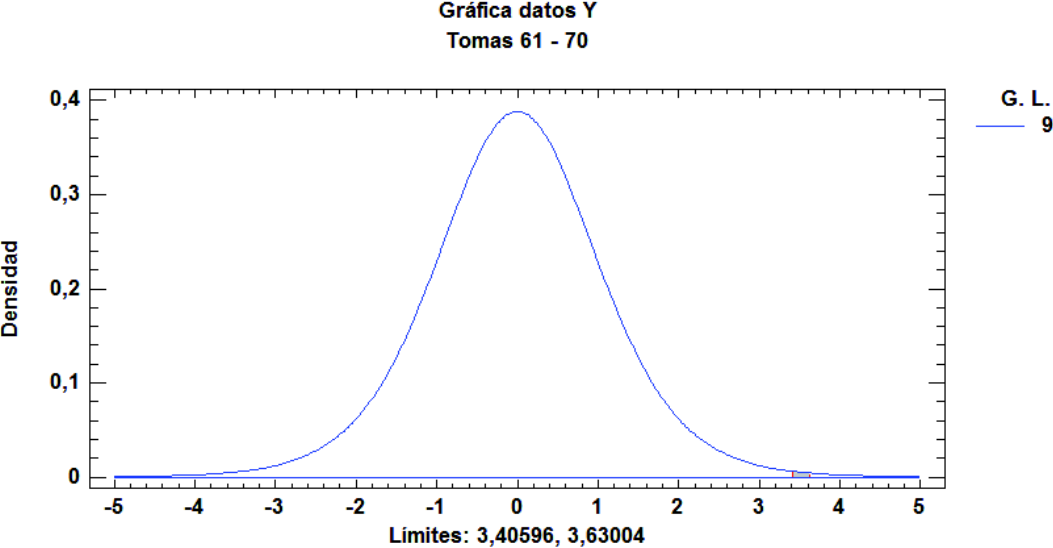
ANEXO 7: GRÁFICAS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Continuación

Gráfica de los datos del foco en X de las tomas 61 a la 70



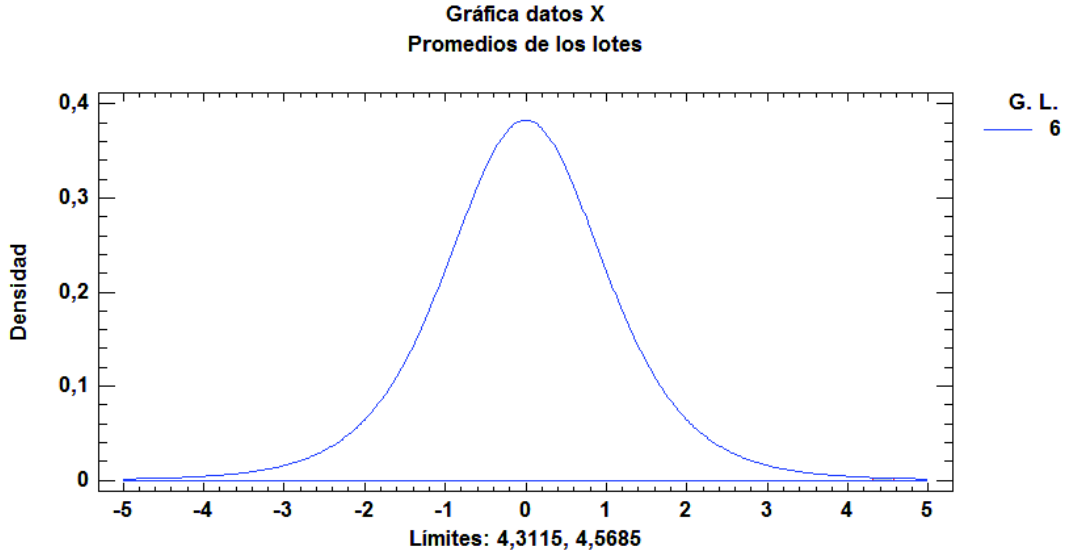
Gráfica de los datos del foco en Y de las tomas 61 a la 70



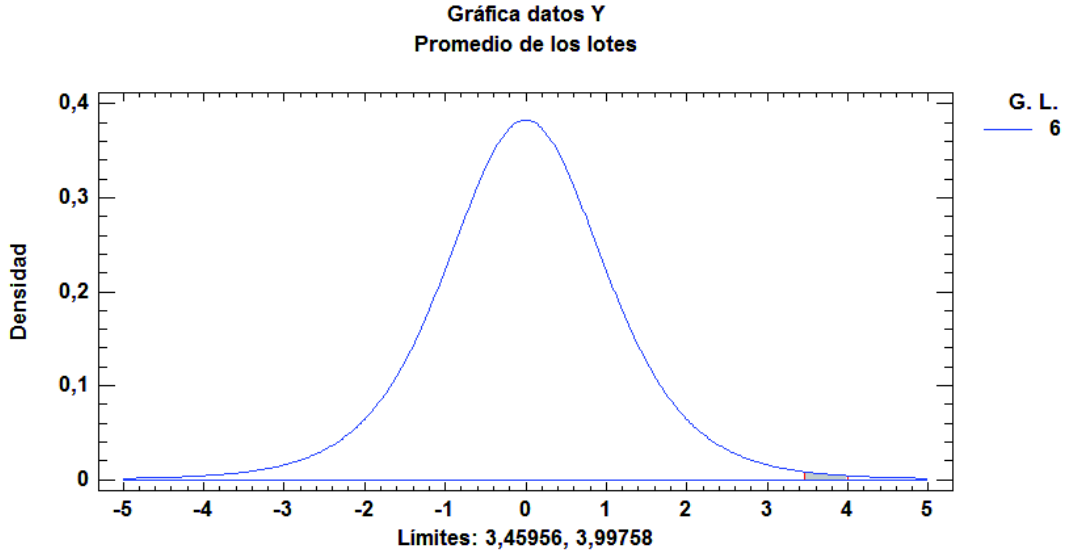
ANEXO 7: GRÁFICAS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Continuación

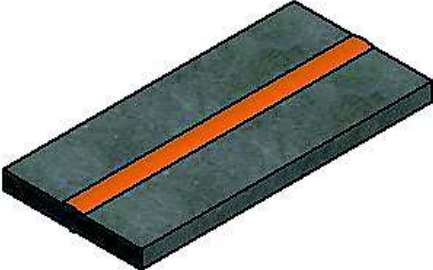
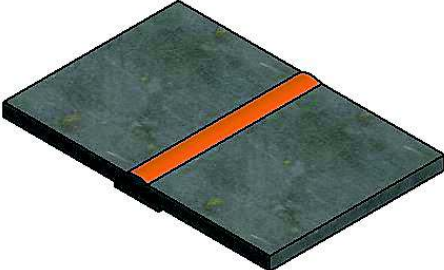
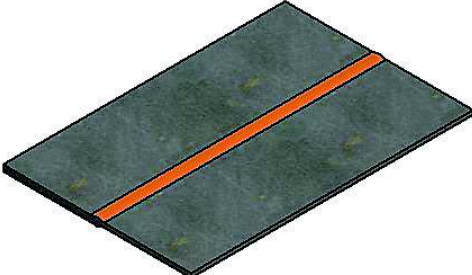

Gráfica de los promedios de los lotes de los datos en X



Gráfica de los promedios de los lotes de los datos en Y



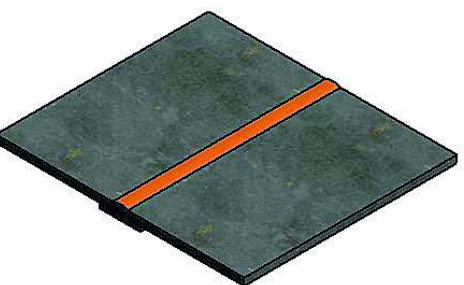



ANEXO 8: DIMENSIONES Y ESQUEMAS DE PROBETAS SOLDADAS

ESQUEMA	N° de probeta	Espesor total (mm)	Largo de placa (mm)	Ancho de placa (cm)	Ancho del cordón (mm)
	01	14,7	200	9,5	15
	02	22,8	200	30,5	24
	03	8,6	285	19	14
	04	17,7	200	30,5	17

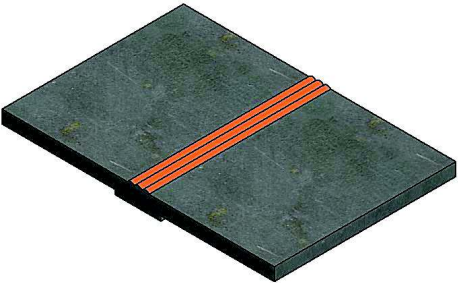


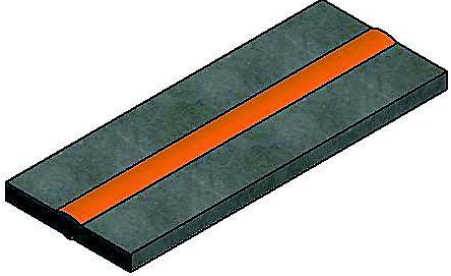
ANEXO 8: DIMENSIONES Y ESQUEMAS DE PROBETAS SOLDADAS

Continuación

ESQUEMA	N° de probeta	Espesor total (mm)	Largo de placa (mm)	Ancho de placa (cm)	Ancho del cordón (mm)
	05	13,5	210	24,5	14
	06	13,6	210	24,5	14
	07	13,9	210	24,5	15
	08	13,0	220	27,5	13

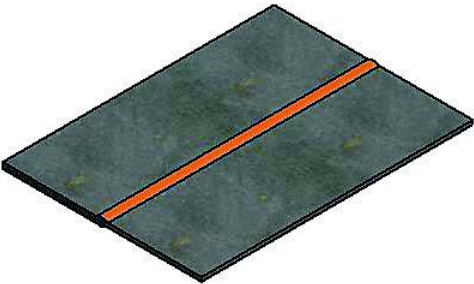
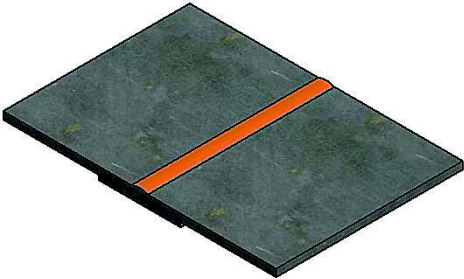
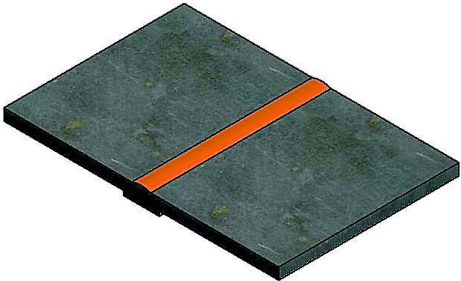

ANEXO 8: DIMENSIONES Y ESQUEMAS DE PROBETAS SOLDADAS

Continuación

ESQUEMA	N° de probeta	Espesor total (mm)	Largo de placa (mm)	Ancho de placa (cm)	Ancho del cordón (mm)
	09	21,1	200	30	24
	10	14,5	210	23,5	14
	11	12,4	210	24,5	14
	12	21,0	330	13	27

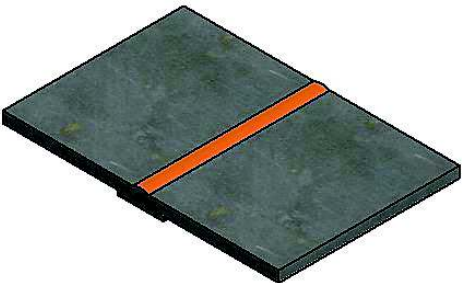
ANEXO 8: DIMENSIONES Y ESQUEMAS DE PROBETAS SOLDADAS

Continuación



ESQUEMA	N° de probeta	Espesor total (mm)	Largo de placa (mm)	Ancho de placa (cm)	Ancho del cordón (mm)
	13	8,0	280	20,5	12
	14	15,0	205	30	18
	15	19,5	200	30,5	21
	16	14,1	215	27,5	11

ANEXO 8: DIMENSIONES Y ESQUEMAS DE PROBETAS SOLDADAS

Continuación

ESQUEMA	N° de probeta	Espesor total (mm)	Largo de placa (mm)	Ancho de placa (cm)	Ancho del cordón (mm)
	17	19,0	200	30,5	18

Continuación: Probetas cilíndricas

ESQUEMA	N° de probeta	Espesor total (mm)	Largo probeta (mm)	Diámetro interior (mm)	Ancho del cordón (mm)
	18	6,0	105	92	11
	19	4,0	150	62	11