

## ESTADÍSTICA DE LOS PARÁMETROS DE EMISIÓN ACÚSTICA EN VAINAS DE ZIRCALOY-4

*M.E. Oliveto<sup>(1)</sup>, M. I. López Pumarega<sup>(1)</sup>, J. A. Regueiro<sup>(2)</sup>, J. E. Ruzzante<sup>(1)</sup>.*

*(1) Unidad de Actividad ENDE, Centro Atómico Constituyentes, Comisión Nacional de Energía Atómica, Av. General Paz 1499, 1650 San Martín, Pcia. Buenos Aires, ARGENTINA.*

*(2) Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Av. General Paz s/n, 1650 San Martín, Prov. Buenos Aires, ARGENTINA.*

*Miembros del GLEA, Grupo Latinoamericano de Emisión Acústica*

*E-mails: [oliveto@cnea.gov.ar](mailto:oliveto@cnea.gov.ar) [lopezpum@cnea.gov.ar](mailto:lopezpum@cnea.gov.ar) [ruzzante@cnea.gov.ar](mailto:ruzzante@cnea.gov.ar)*

### RESUMEN

En el presente trabajo se hace el Análisis Estadístico de los parámetros de Emisión Acústica: Amplitud, Duración y Risetime o Tiempo de Subida, de las señales producidas en ensayos de presurización hasta rotura de 11 vainas combustibles, de Zircaloy-4 tipo Candu, cinco de ellas sin defectos y seis defectuosas. Las distribuciones de los parámetros Amplitud y Duración fueron ajustadas con la función Lognormal y la del Risetime con la función Exponencial. Se comprobó, usando Análisis de Varianza, que por la Emisión Acústica se puede diferenciar el lote de vainas sin defecto del lote de vainas defectuosas. El Análisis de Clusters, aplicado a los valores medios de los 3 parámetros de cada ensayo, no permitió diferenciar los dos lotes de vainas considerados.

### ABSTRACT

Statistic analysis of Acoustic Emission signals parameters: Amplitude, Duration and Risetime was carried out. Candu type Zircaloy-4 fuel claddings were pressurized up to rupture, one set of five normal pieces and six with defects included, Acoustic Emission was used on-line. Amplitude and Duration frequency distributions were fitted with Lognormal distribution functions, and Risetime with an Exponential one. Using Analysis of Variance, Acoustic Emission was appropriated to distinguish between defective and non-defective subsets. Clusters analysis applied on mean values of Acoustic Emission signal parameters were not effective to distinguish two sets of fuel claddings studied.

### 1. INTRODUCCIÓN

En un trabajo anterior<sup>[1]</sup> se efectuó el análisis y caracterización de la Emisión Acústica (EA) en vainas combustibles de Zircaloy-4 tipo Candu, para lo cual se sometió a las vainas a un ensayo de presurización interna, con los extremos cerrados y a temperatura ambiente, hasta alcanzar su rotura. Se tomaron 2 lotes de vainas, uno de cinco vainas sin defectos y otro de seis vainas con distintos defectos típicos de fabricación.

Los valores obtenidos de los parámetros de las señales de EA: Amplitud (A), Duración (D) y Risetime (R) de 11

ensayos realizados bajo condiciones similares, son el objeto del estudio estadístico del presente trabajo. La Tabla 1 describe las vainas estudiadas y algunas de sus propiedades más importantes, los valores de la Presión de Rotura están indicados en Psi.

Las herramientas matemáticas que se utilizan son técnicas de Análisis de Datos Multivariable, de Estadística Paramétrica y cuando las condiciones planteadas así lo requieren, métodos de Estadística No Paramétrica. En todos los casos para el análisis estadístico se usan los paquetes STATISTICA 5.0 y STATGRAPHICS-PLUS 3.1. Los resultados de los tests estadísticos, como las decisiones que de ellos se deducen,

están determinados por los valores obtenidos en los P-value correspondientes, tomándose

como nivel de significación  $\alpha = 0.05$ .

Tabla 1. Vainas analizadas y sus propiedades más importantes.

	2	3	4	5
	FACTOR	DEFECTO	P_ROTURA	EVENTOS
23	1	no	7850.0	25
24	2	impronta	6736.0	113
27	2	impronta	7545.0	15
28	2	facetado	7814.0	155
29	1	no	7814.0	141
30	1	no	7949.0	111
31	1	no	7949.0	51
33	1	no	7814.0	68
34	2	desgarro	7275.0	23
35	2	uña	6871.0	77
36	2	ovalidad	7545.0	27

## 2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS SEÑALES DE EA.

Para cada ensayo se busca la función que mejor ajuste a cada uno de las histogramas experimentales de la A, D y R. Dado que los histogramas son asimétricos, se compararon con las distribuciones Exponencial, Gamma, Chi-cuadrado y Lognormal.

En el análisis de los tres parámetros A, D y R se utilizaron los dos programas estadísticos nombrados arriba, comparándose los resultados de los mismos, de dicha comparación se vio que el STATGRAPHICS-PLUS es más exigente en sus condiciones.

A continuación se listan los resultados para los tres parámetros de las señales de EA de todos los ensayos:

AMPLITUD: se encuentra que el mejor ajuste para la A está dado por la función Lognormal, ver ejemplos en la Figura 1, salvo en los ensayos 27 y 35. Este resultado concuerda con el de otros trabajos realizados anteriormente<sup>[1][2]</sup>.

DURACIÓN: se encuentra, también acá, que el mejor ajuste está dado por la función de distribución Lognormal, ver ejemplos en la Figura 2, exceptuando el ensayo 28.

RISETIME: se encuentra que el mejor ajuste está dado por la función de distribución Exponencial, ver Figura 3, salvo para los ensayos 23, 29 y 36.

El ajuste obtenido para la A y el R coinciden con el dado en la referencia (1), a

diferencia de la D, donde se obtuvo que el mejor ajuste está dado por la distribución Lognormal.

### 2.1 ESTUDIO DE DIFERENCIAS EN VAINAS CON DEFECTOS Y SIN DEFECTOS.

El objetivo es averiguar diferencias o semejanzas entre el conjunto de las vainas defectuosas y el de las vainas sin defectos. Debemos comparar medias de distintos grupos, las cuales son calculadas a partir de distribuciones de probabilidades que no son de tipo Normal, sino asimétricas positivas. Con este motivo se plantean diferentes Análisis de Varianza (ANOVA) para A, D y R.

Las hipótesis de este test son:

- Normalidad de las muestras
- Homogeneidad de las varianzas

Formamos 2 grupos, uno con las vainas defectuosas y el otro con las vainas sin defecto. Planteamos un Análisis de Varianza con un Factor (variable independiente) de 2 niveles:

- Sin defecto = 1
- Con defecto = 2

Para chequear las varianzas de estos dos lotes aplicamos los tests de Cochran y Bartlett para las tres variables A, D y R:

#### Variance Check para la A.

Cochran's C test: 0,604138 P-Value = 0,0000  
Bartlett's test: 1,02247 P-Value = 0,0000

Variance Check para la D.

Cochran's C test: 0,687606 P-Value = 0,0000  
 Bartlett's test: 1,07916 P-Value = 0,0000

Variance Check para el R.

Cochran's C test: 0,808551 P-Value = 0,0000  
 Bartlett's test: 1,26865 P-Value = 0,0000

El valor del P-value para los tres parámetros es menor que  $\alpha = 0.05$ . Tenemos entonces que hay una diferencia significativa entre las desviaciones standard de las muestras, a un nivel de confianza del 95%, para la A, la D y el R.

Como no se cumplen para la Amplitud, la Duración y el Risetime ninguna de las hipótesis del test ANOVA, utilizamos el método no paramétrico de Kruskal-Wallis<sup>[3]</sup>, que testea la igualdad de las medianas y que puede ser aplicado en el caso general en que no se conocen las distribuciones de las variables. A continuación se indican los resultados obtenidos:

Kruskal-Wallis Test for AMPLITUD by FACTOR

FACTOR	Sample Size	Average Rank
1	396	424,721
2	409	381,969

Test statistic = 6,80108 P-Value = 0,0091

Kruskal-Wallis Test for DURACION by FACTOR

FACTOR	Sample Size	Average Rank
1	394	421,24
2	408	382,438

Test statistic = 5,62335 P-Value = 0,0177

Kruskal-Wallis Test for RISETIME by FACTOR

FACTOR	Sample Size	Average Rank
1	395	383,48
2	408	419,93

Test statistic = 4,95696 P-Value = 0,0260

Como consecuencia de que el P-value obtenido en los tres estudios, es menor que  $\alpha = 0.05$ , hay que rechazar la igualdad de las medianas entre los grupos, es decir, podemos diferenciar las vainas defectuosas y las sin defectos en base a la Amplitud, la Duración y el Risetime de los eventos de EA. El resultado obtenido en este análisis para el parámetro A, no coincide con el dado en el trabajo de la referencia 1, pero debe tenerse en cuenta que en dicho trabajo se comparan sólo los valores medios de la Amplitud de cada ensayo, por lo tanto consideramos que este resultado, que incluye todos los eventos de cada ensayo es más representativo.

Independientemente de los defectos, todas las vainas rompieron a presiones no muy diferentes entre sí (ver Tabla 1), aunque las vainas con defecto tienen una Presión de Rotura algo menor que las vainas sin defecto. Estudiamos acá, si se pueden diferenciar las vainas defectuosas de las otras, por la Presión de Rotura. Aplicamos el análisis ANOVA a la Presión de Rotura (P). Estudiamos la igualdad de las varianzas de las dos muestras o lotes, definiendo FACTOR=1 para las cinco vainas sin defectos y FACTOR=2 para las seis vainas con defectos.

Variance Check para la P

Cochran's C test: 0,973897 P-Value = 0,0021  
 Bartlett's test: 2,83483 P-Value = 0,0036

Como el menor de los P-value es menor que 0.05, rechazamos la igualdad de varianzas, ya que hay una diferencia estadística significativa entre las desviaciones estándar con un 95% de confiabilidad. Usamos entonces el test de Kruskal-Wallis para chequear las medianas, con el siguiente resultado:

Kruskal-Wallis Test for P.ROTURA by FACTOR

FACTOR	Sample Size	Average Rank
1	5	8,8
2	6	3,66667

Test statistic = 6,71651 P-Value = 0.0095

Como el P-value es menor que 0.05, hay una diferencia estadística significativa entre las medianas de los dos grupos. En la figura 4 se graficaron los rangos de valores de las presiones de Rotura para cada lote, sus valores medios, máximos, mínimos y el rango intercuartil, allí se aprecian claramente las diferencias manifestadas por el test. Concluimos entonces que se puede diferenciar el conjunto de las vainas defectuosas del conjunto de las vainas sin defecto, por medio de la Presión de Rotura.

## 2.2 ESTUDIO DE DIFERENCIAS ENTRE VAINAS CON DEFECTOS

Analizamos el conjunto de las vainas defectuosas (24, 27, 28, 34, 35, 36) para ver si es posible por medio de la EA diferenciar los distintos defectos de fabricación. Usando los tests de Cochran y Bartlett testeamos las varianzas para la A, la D y el R para las seis vainas con defectos:

### Variance Check para la A

Cochran's test: 0.2645 P-value: 0.0000

Bartlett's test: 1.04 P-value: 0.0100

### Variance Check para la D:

Cohran's Check: 0.2420 P-value: 0.0015

Bartlett's Check: 1.0329 P-value: 0.0470

### Variance Check para el R:

Cochran's C test: 0,716273 P-Value = 0,000

Bartlett's test: 2,87563 P-Value = 0,000

Como el P-value en todos los casos es menor que el nivel de significación de 0.05, concluimos que hay una diferencia estadística significativa entre las desviaciones estándar de la A, la D y el R en los 6 niveles considerados. Como no se cumplen las hipótesis del ANOVA, aplicamos entonces, el test de Kruskal-Wallis para testear la igualdad de las medianas:

### Kruskal-Wallis Test for AMPLITUD by ARCHIVO

ARCHIVO	Sample Size	Average Rank
ari24	114	192,434

ari27	15	249,4
ari28	155	213,981
ari34	23	235,717
ari35	75	189,533
ari36	27	198,63

Test statistic = 7,21417 P-Value = 0,205194

### Kruskal-Wallis Test for DURACION by ARCHIVO

ARCHIVO	Sample Size	Average Rank
ari24	114	184,224
ari27	15	207,267
ari28	154	224,506
ari34	23	224,913
ari35	75	184,047
ari36	27	213,889

Test statistic = 10,9282 P-Value = 0,06282

### Kruskal-Wallis Test for RISETIME by ARCHIVO

ARCHIV	Sample Size	Average Rank
ari24	114	168,522
ari27	15	139,967
ari28	155	189,745
ari34	23	179,196
ari35	74	318,682
ari36	27	185,574

Test statistic = 88,6802 P-Value = 0,000

Como el P-value dado por el test, para la A y la D, es mayor que 0.05, no rechazamos la hipótesis nula de igualdad de las medianas, con un nivel de confianza del 95%. Sin embargo el P-value dado por el test en el caso del R es menor que 0.05 lo que permite considerar que las medianas de los ensayos presentan diferencias significativas. Concluimos que no podemos considerar estos ensayos como réplicas de una misma población, ni podemos individualizar los distintos defectos de fabricación que presentan los tubos analizados. En las Figuras 5, 6 y 7, se graficaron para cada ensayo los valores de A, D y R con sus respectivos valores medios máximos, mínimos y rango intercuartil, allí se

ve claramente que las medianas de la A y la D son muy similares entre sí.

Ya probamos que la Presión de Rotura sí diferencia la presencia o ausencia de defectos de fabricación, veremos si puede identificarlos, para eso testeamos las varianzas de la Presión de Rotura en los 6 niveles de vainas con defectos:

Variance Check para la Presión de Rotura:

Cochran's test: 0.3099 P-value = 0.0000  
Bartlett test: 1.1590 P-value = 0.0000

Como el P-value es menor que 0.05, esto indica rechazar la igualdad de varianzas, es decir hay una diferencia significativa entre las desviaciones estándar para la Presión de Rotura. Aplicamos entonces el test de Kruskal-Wallis que prueba la igualdad de las medianas:

Kruskal-Wallis Test for P ROTURA by VAINA

VAINA	Sample Size	Average Rank
24	1	1,0
27	1	4,5
28	1	6,0
34	1	3,0
35	1	2,0
36	1	4,5

Test statistic = 5,0 P-Value = 0,41588

Puesto que el P-value dado por el test es mayor que 0.05, no rechazamos la hipótesis nula de igualdad de las medianas para la P en los 6 casos considerados al nivel de confianza del 95%, por lo tanto en el lote de vainas con defectos los valores de la Presión de Rotura no presentan diferencias significativas entre sí, lo que no permite diferenciar por la P de Rotura los diferentes defectos superficiales que presentan las vainas analizadas.

**2.3 ESTUDIO DE SEMEJANZAS EN VAINAS SIN DEFECTOS**

Analizamos el conjunto de vainas sin defectos (23, 29, 30, 31 y 33), para ver si es posible por la EA identificarlas como pertenecientes a la misma población muestral.

Testeamos las varianzas de la A, la D y el R en los cuatro ensayos:

Variance Check para la A

Cochran's test: 0.3211 P-value: 0.0890  
Bartlett's test: 1.0239 P-value: 0.0550

Variance Check para la D

Cochran's test: 0.6196 P-value: 0.0000  
Bartlett's test: 1.2094 P-value: 0.0000

Variance Check para el R:

Cochran's test: 0.2645 P-value: 0.0000  
Bartlett's test: 1.043 P-value: 0.0100

Como el P-value para la D y el R es menor que el nivel de significación elegido, deseamos la hipótesis de la igualdad de varianzas, hay entonces una diferencia estadística significativa entre las desviaciones estándar de la D y R. Como en los otros análisis aplicamos el test de Kruskal-Wallis para analizar las medianas:

Kruskal-Wallis Test for AMPLITUD by ARCHIVO

ARCHIVO	Sample Size	Average Rank
ari23	25	158,02
ari29	141	190,596
ari30	111	205,644
ari31	51	207,333
ari33	64	200,047

Test statistic = 4,51826 P-Value = 0,340388

Kruskal-Wallis Test for DURACION by ARCHIVO

ARCHIVO	Sample Size	Average Rank
ari23	25	150,24
ari29	141	202,826
ari30	109	203,431
ari31	51	182,755
ari33	64	193,688

Test statistic = 5,8 3 P-Value = 0.2119

Kruskal-Wallis Test for RISETIME by ARCHIVO

ARCHIVO	Sample Size	Average Rank
---------	-------------	--------------

ari23	25	150,6
ari29	140	186,275
ari30	111	210,252
ari31	51	203,676
ari33	64	204,172

Test statistic = 7,40764 P-Value = 0,115852

Puesto que el P-value dado por el test para A, D y R es mayor que 0.05, no rechazamos la hipótesis de igualdad de medianas. En las Figuras 8, 9 y 10 se graficaron para cada ensayo los valores de A, D y R con sus respectivos valores medios, máximos, mínimos y rango intercuartil, allí se ve claramente que las medianas son muy similares entre sí. Se concluye que no hay diferencias significativas en las medianas de los parámetros de la EA de las vainas sin

defectos y las consideramos pertenecientes a la misma población muestral.

### 3. AGRUPAMIENTO DE LAS VAINAS.

Hemos rechazado la igualdad de las medianas entre el conjunto de las vainas defectuosas y el conjunto de las vainas sin defecto. Queremos probar ahora si las diferencias entre estos dos lotes se mantienen.

Cada vaina está definida por un número de observaciones donde son medidas 3 variables: A, D y R. La dificultad que nos encontramos es la de valorar estos 3 parámetros simultáneamente. Utilizando un tratamiento sencillo, podríamos analizar las vainas por el valor medio de estos parámetros, ver Tabla 2.

Tabla 2. Valores medios de los parámetros A, D y R para cada ensayo.

	2	3	4	5
	AMPLITUD	DURACIÓN	RISETIME	DEFECTO
23	2078.90	283.400	36.	----
24	2156.29	211.86	47.60	impronta
27	2785.07	259.60	46.06	impronta
28	2509.05	267.60	55.71	facetado
29	2713.30	296.51	51.19	----
30	2800.00	314.87	64.16	----
31	2666.95	302.75	64.60	----
33	2436.00	237.00	56.00	----
34	2575.96	293.30	67.20	desgarro
35	2575.95	225.82	52.70	uñaazo
36	2130.50	252.10	53.7	ovalidad

Debemos tener en cuenta que en este primer estudio se está perdiendo mucha información debido a que resumimos toda la información de la EA de una vaina, en los valores medios de los tres parámetros. En la Figura 11 se ha representado en el espacio (A, D, R) un punto por cada vaina, el valor en cada punto indica el número de la vaina.

Para ver qué vainas son de tipo similar, trabajando con los valores medios de los 3 parámetros, aplicamos un Análisis de Clusters<sup>[4]</sup>. Cada uno de los métodos de clasificación se basa en algoritmos y métricas

diferentes, siendo las métricas consideradas la Euclídea y Euclídea Cuadrática.

La metodología seguida fue obligar a que existieran 2 grupos, uno para las vainas sanas y el otro para las vainas con defectos, pero debido a que los valores medios de los 3 parámetros A, D y R no definen claramente un grupo, ya que están bastante próximos entre sí, no se obtuvo la separación en clusters esperada.

También se intentó en este análisis la metodología de obligar la existencia de 6 grupos, uno por cada tipo de defecto

presentado por las vainas y otro por la ausencia de defectos. En ninguno de los casos, el agrupamiento en clusters resultante fue representativo de los diferentes lotes de vainas analizadas. Podría interpretarse que la pérdida de información resultante como consecuencia de tomar los valores medios de los parámetros es significativa estadísticamente. En el Análisis de Clusters no se pudieron incluir todos los valores de cada uno de los ensayos puesto que esa cantidad de datos traía dificultades en el procesamiento de los mismos.

Analizando la Figura 11, se observa que con excepción de la Vaina 23, los valores medios de la A y la D de los eventos de las vainas sin defecto, son mayores que los de las vainas defectuosas.

## 5. CONCLUSIONES

En el Análisis Estadístico de los parámetros de EA de las 11 vainas combustibles se encontró que la A se ajusta con la función de distribución Lognormal; este resultado coincide con resultados obtenidos en estudios anteriores ya citados en este trabajo. LA D se ajustó también con la distribución Lognormal y el R con la función Exponencial, pero no en todos los casos.

Trabajando con todos los datos de los eventos de EA, obtenidos en las vainas, planteando un Análisis de Anova y utilizando el método no paramétrico de Kruskal-Wallis, se comprobó que la EA permite diferenciar el lote de las vainas sin defecto del lote de las vainas defectuosas.

También se encontró que todos los ensayos con vainas sin defecto, pertenecen a una misma población muestral y por lo tanto consideramos que los ensayos de estas vainas son réplicas unos de otros.

Por medio de la Presión de Rotura de las vainas, se pudo diferenciar el conjunto de las vainas defectuosas del conjunto de las vainas sin defecto, pero esta variable no

permitió distinguir los distintos defectos superficiales que presentaban las vainas defectuosas.

Se concluye que no hay diferencias significativas en las medianas de los parámetros de la EA de las vainas sin defectos, por lo tanto consideramos que estos ensayos son réplicas entre sí y las vainas pertenecen a la misma población muestral.

El Análisis de Clusters, aplicado a los valores medios de los 3 parámetros de EA: A, D y R de cada ensayo, no diferenció los 2 lotes de vainas considerados ni caracterizó los diferentes defectos de las vainas. Esto puede deberse a que los valores medios de los parámetros no definen claramente un grupo y que el número de ensayos de vainas con un mismo tipo de defecto es sin duda muy pobre. Sería conveniente realizar nuevos ensayos para dar a este análisis mayor confiabilidad y tener posiblemente resultados más representativos.

## 6. REFERENCIAS

1 - "Estudio y caracterización de la Emisión Acústica en vainas combustibles tipo CANDU", J. A. Regueiro, Tesis de Maestría en Ciencia y Tecnología de los Materiales, Instituto de Tecnología Profesor J. A. Sábato, UNSAM-CNEA, 1998.

2 - "Discussion of the Lognormal Distribution of Amplitudes in Acoustic Emission Signals", M.I. Lopéz Pumarega, R. Piotrkowski, J.E. Ruzzante, Journal of Acoustic Emission, Vol 17, N° 1-2, pp. 61-67, 1999.

3 - "Análisis estadístico de las agrupaciones cluster en fenómenos de Emisión Acústica", A. Suarez Llorens, Universidad de Cádiz, España, Informe Beca Intercampus, UNSAM-CNEA, 1998.

4 - "Applied Multivariate Statistical Analysis", R. Johnson & D. Wickern, Ed. Prentice Hall, 1991.

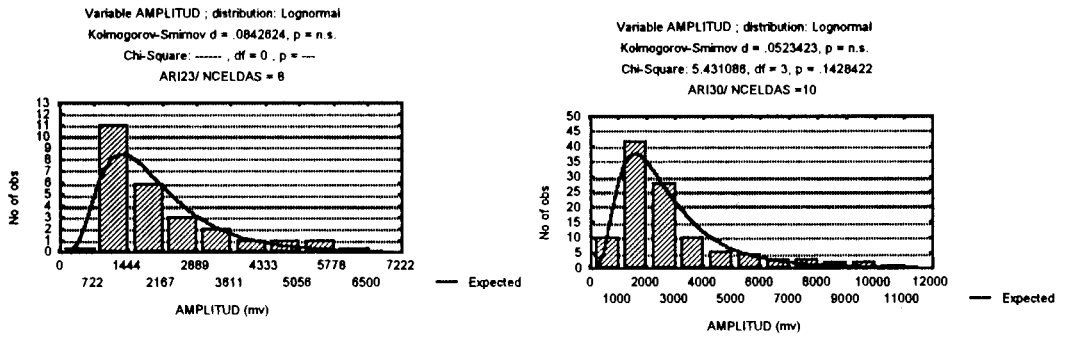


FIGURA 1. Histograma de A y su función de di

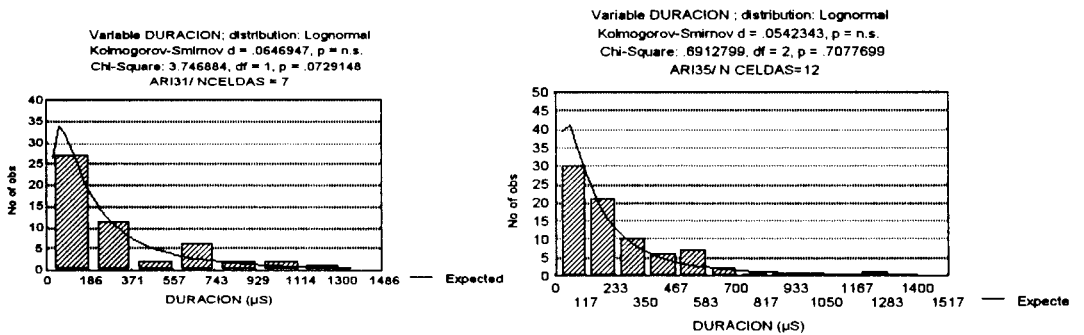


FIGURA 2. Histograma de D y su función de distribución

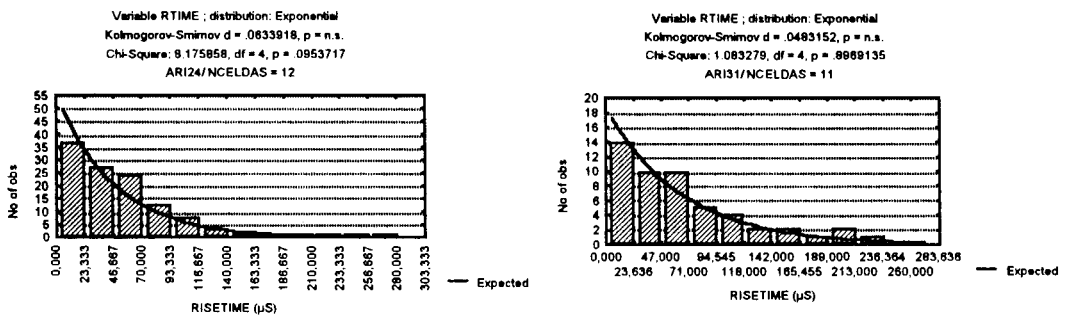


FIGURA 3. Histograma de R y su función de distribución.



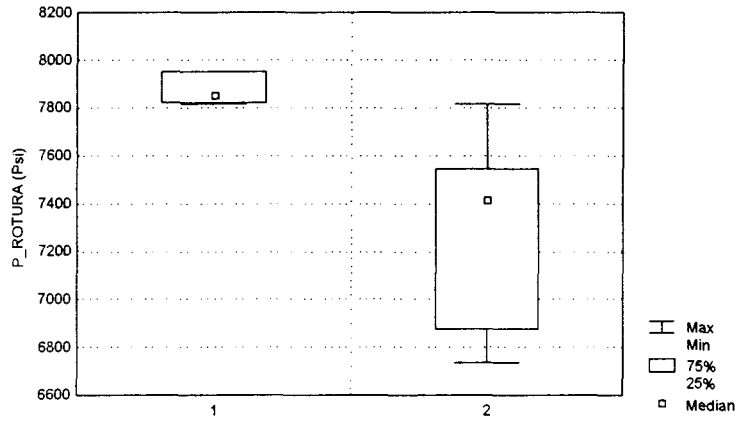


FIGURA 4. Valores Medios de la Presión de Rótura  
Factor (1 = Sin defecto, 2 = Con Defecto)

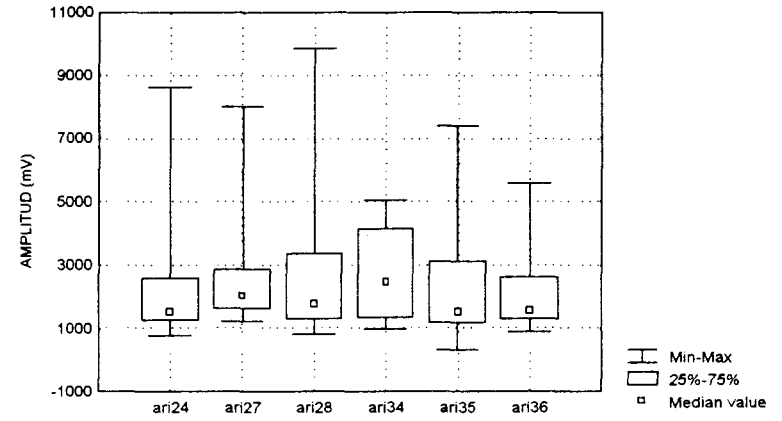


FIGURA 5. Vainas con Defectos  
Valores Medios de la Amplitud

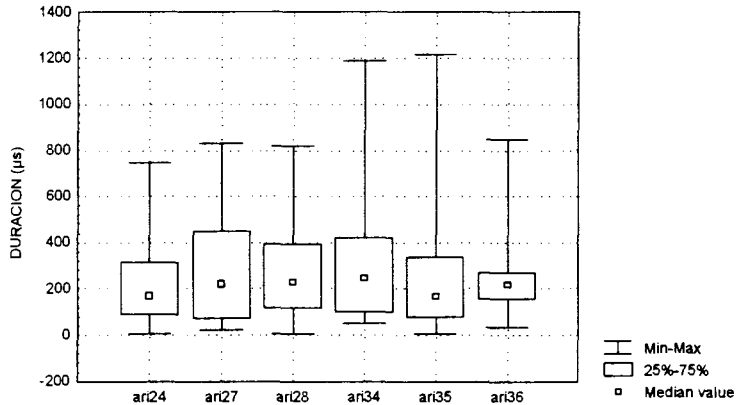


FIGURA 6. Vainas con Defectos  
Valores Medios de la Duración

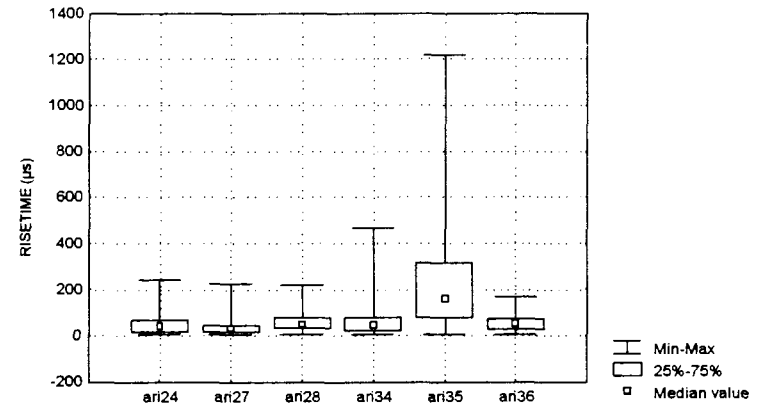


FIGURA 7. Vainas con Defecto  
Valores Medios del Risetime

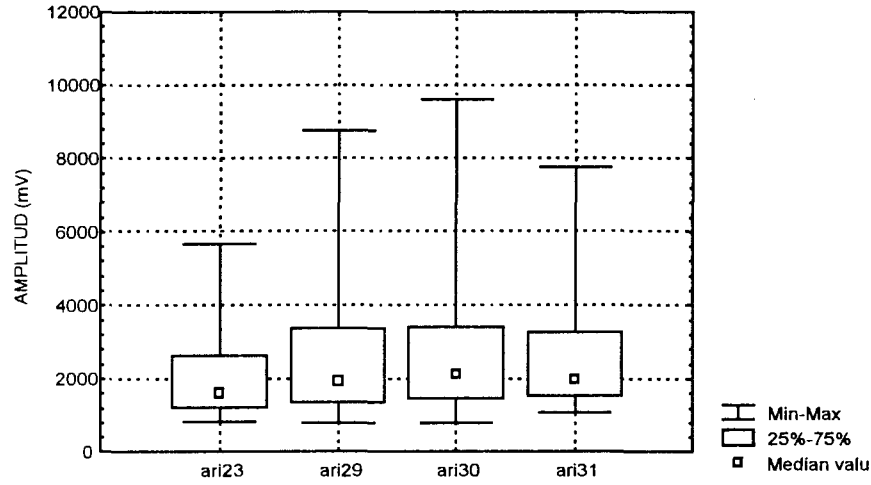


FIGURA 8. Vainas sin Defectos  
Valores Medios de la Amplitud

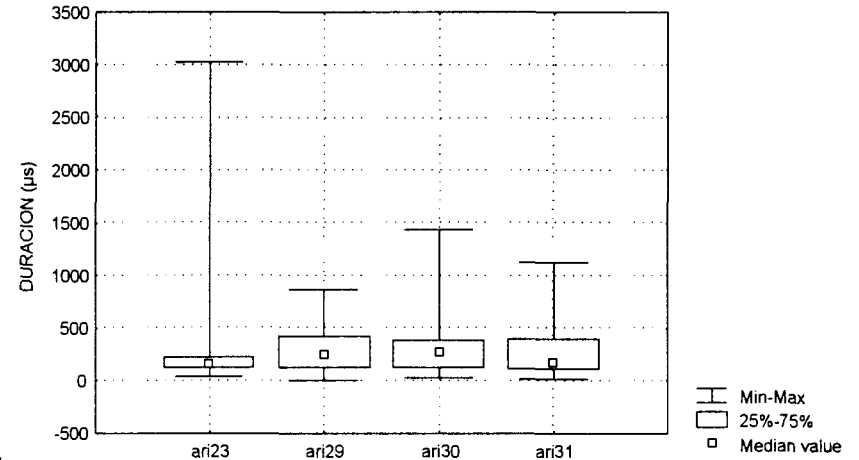


FIGURA 9. Vainas sin Defectos  
Valores Medios de la Duración

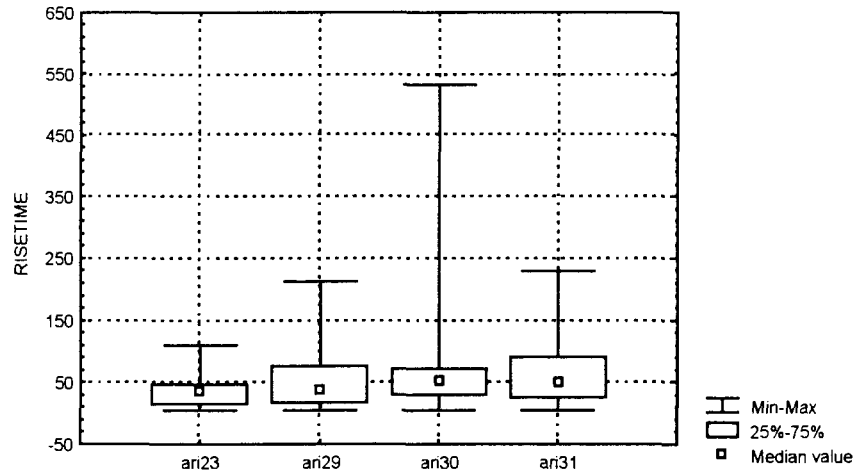


FIGURA 10. Vainas sin Defectos  
Valores Medios del Risetime

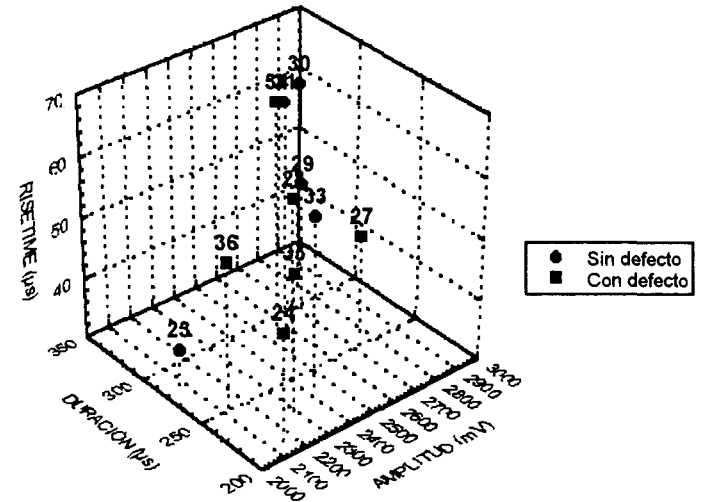


FIGURA 11. Valores medios de A, D y R de las 11 vainas combustibl