

### 4.3.2 Observación superficial de la tubería y microscópica de la microestructura.

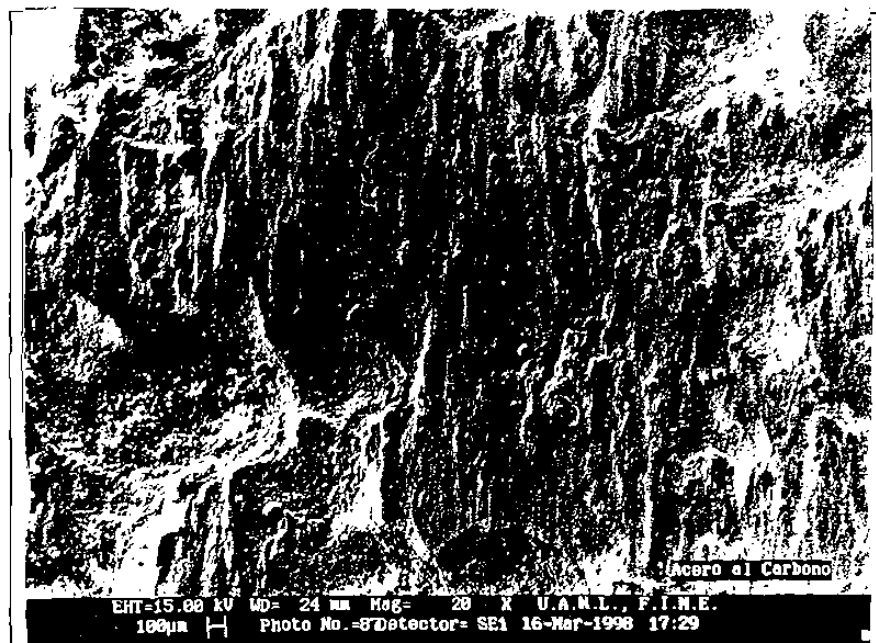
#### Observación superficial

De las observaciones en las superficies de las zonas estudiadas en la tubería, se seleccionaron las imágenes obtenidas en el SEM más representativas del daño encontrado, en donde se realizaron análisis químico cualitativo en la superficie, donde se determinó la presencia de fierro esponja adherida en la superficie. Además se detectó óxido de fierro en los aceros bajo carbono y P-22, En el acero inoxidable se detectó solamente el fierro esponja adherido en las huellas de deformación. En la figura 4.11, se observa el daño superficial en los tres aceros utilizados en la prueba.

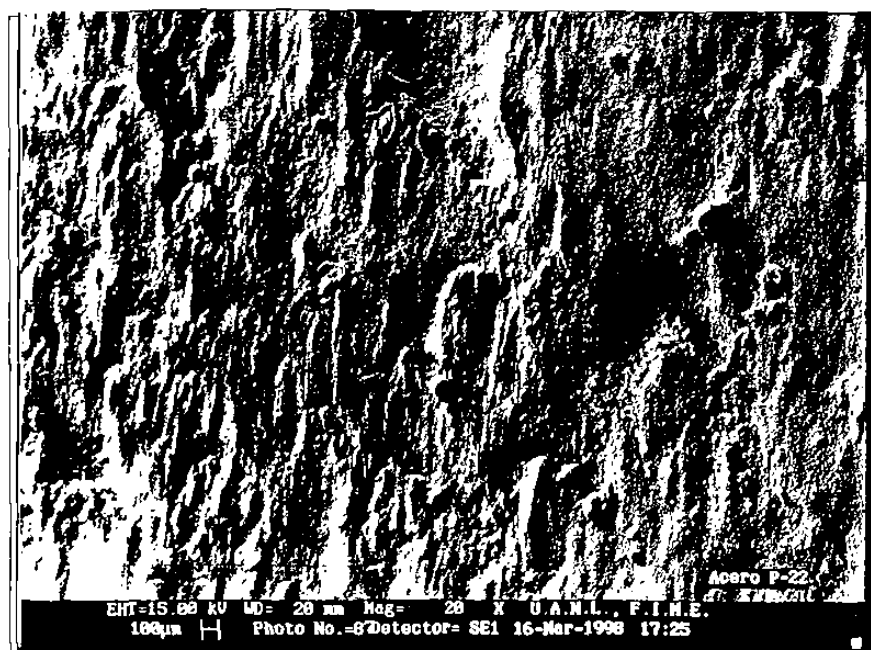
En la figura 4.11 (a) se observa la superficie de desgaste del acero bajo carbono, esta área presenta picaduras de tamaño aproximado de 500  $\mu\text{m}$ . Alrededor de estas zonas se observan zonas de deformación plástica del material. En la figura 4.11 (b) se presenta al acero P-22, donde se observan al igual que el acero bajo carbono, picaduras de tamaño medio de 300  $\mu\text{m}$ , también se tiene el flujo plástico en dirección del transporte de partículas, las zonas de deformación plástica se observan con un desgaste menor aparente que el acero bajo carbono. En la figura 4.11 (c) se presenta el acero inoxidable, la superficie no presenta daño por corrosión, se observa el flujo plástico del material con la aparente deformación plástica, al igual que los demás aceros.

#### Observación de las microestructuras

Como resultados del análisis de la microestructura en los cortes realizados en forma transversal se observó en los aceros bajo carbono y P-22 el daño en la subsuperficie, la profundidad de las picaduras y las áreas de deformación plástica, como se muestra en las figuras 4.12 y 4.13. Dentro de las picaduras se observa una capa de óxido de 10 a 20  $\mu\text{m}$  de espesor. Este óxido no está uniformemente distribuido en toda la zona de desgaste. Inmediatamente después de este óxido, en algunas zonas se aprecia una película delgada, de espesor promedio de 12  $\mu\text{m}$ . Esta película se identificó por análisis de EDX, ver apéndice C, como fierro esponja adherido a la superficie.

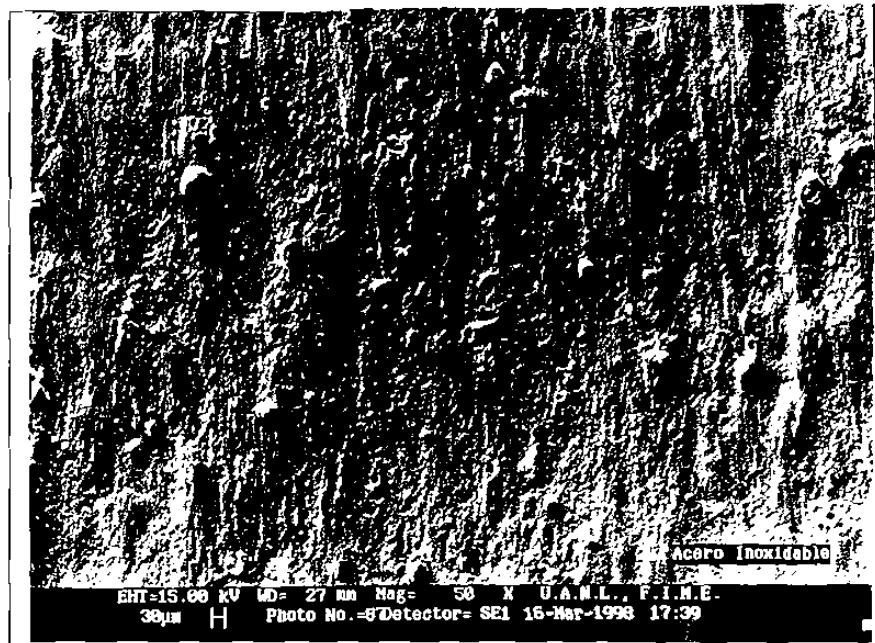


(a) Acero bajo carbono A106 - B



(b) Acero A335 P-22

Figura 4.11. (a) acero bajo carbono A106 - B, (b) acero A335 P-22, después de ser sometidos a la prueba de la planta piloto y (c) acero inoxidable AISI 304 después de ser sometidos a la prueba de la planta piloto (siguiente página).



(c) Acero inoxidable AISI 304

Figura 4.11. (a) acero bajo carbono A106 - B, (b) acero A335 P-22 y (c) acero inoxidable AISI 304 después de ser sometidos a la prueba de la planta piloto.

La figura 4.14, muestra una fotografía (SEM) del acero inoxidable 304 después de la prueba de la planta piloto. La superficie no muestra signos de ataque químico. Sin embargo, puede ser observada una capa de fierro esponja de espesor variable, sobre la superficie. La profundidad de deformación plástica en la austenita cercana a la superficie es pequeña, de tal forma que es difícil apreciar el daño mecánico en este acero a nivel microestructural.

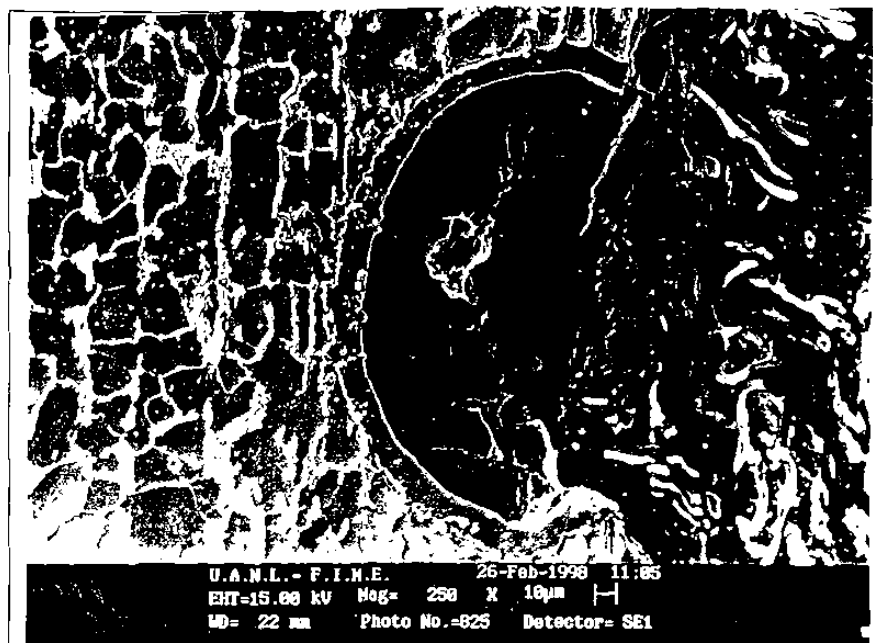


Figura 4.12. Desgaste en la microestructura del acero A106.

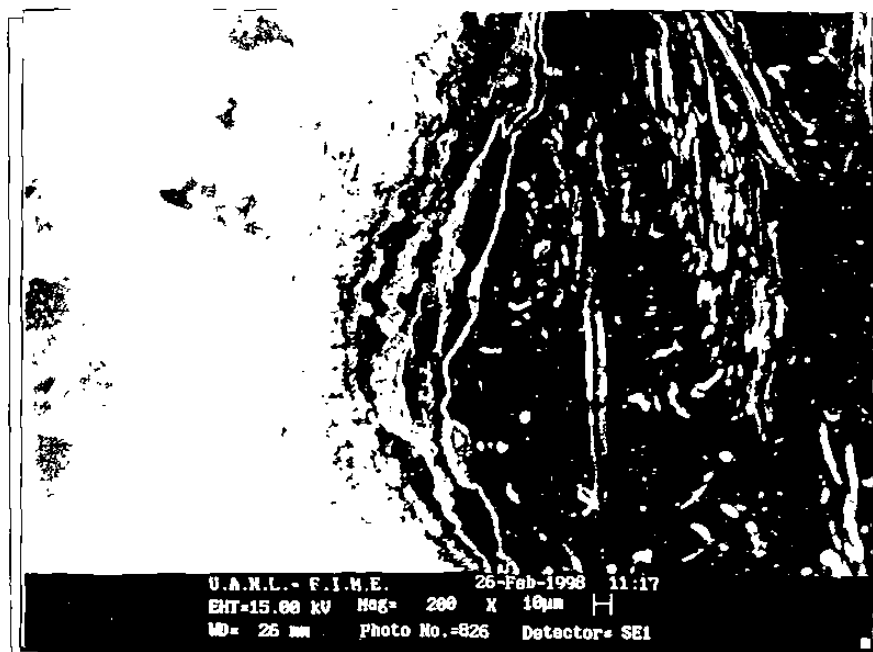


Figura 4.13. Desgaste en la microestructura del acero A335 P-22.

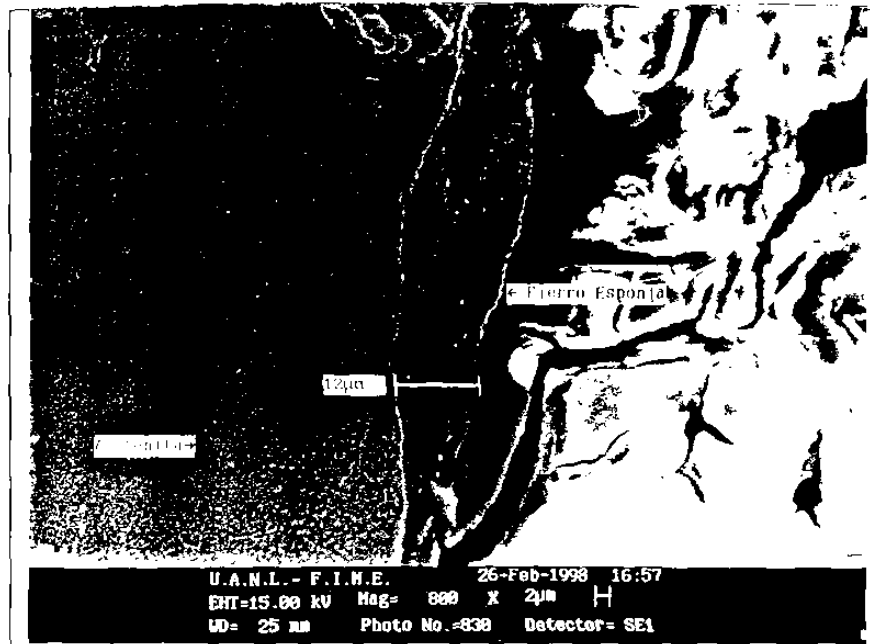


Figura 4.14. Microestructura del acero inoxidable 304, después de ser sometido a la prueba de desgaste en planta piloto.

### 4.3.3 Ensayo de microdureza.

La figura 4.15 muestra los perfiles de microdureza de los aceros. en (a) observamos al acero bajo carbono, con un incremento en la micro dureza de 150 a 400 HV, a una distancia de 0.12 mm a partir de la superficie en contacto. El mismo comportamiento es observado en el acero A335 (b), en el cual el cambio de microdureza es aproximadamente de 180 a 550 HV, a una distancia 0.10 mm desde la superficie. Para el acero AISI 304 (c) el incremento es de 220 a 730 HV, a una distancia de 0.17 mm de la superficie.

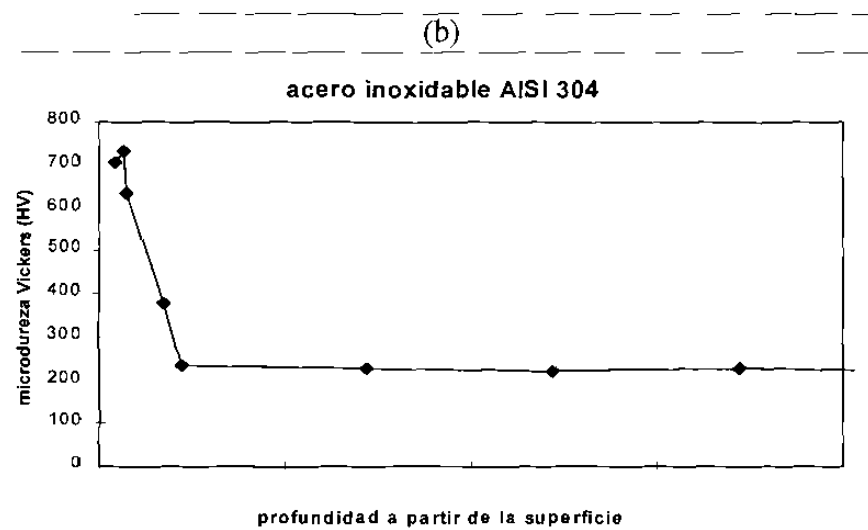
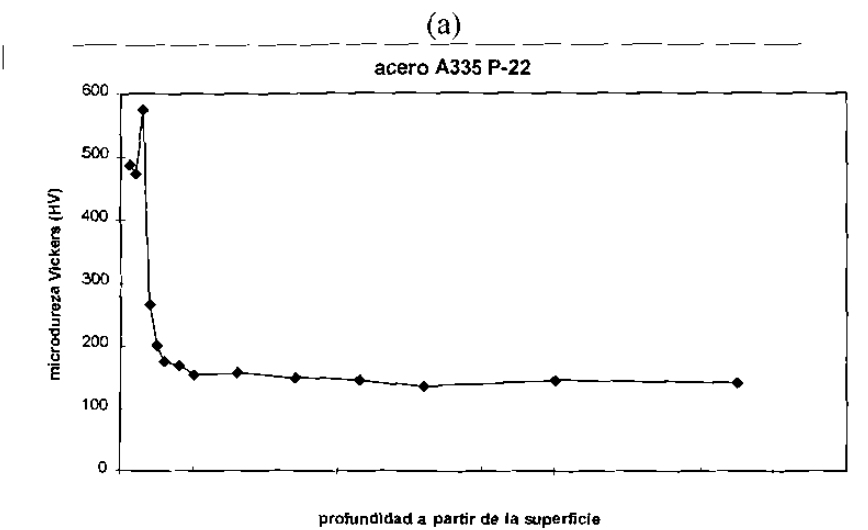
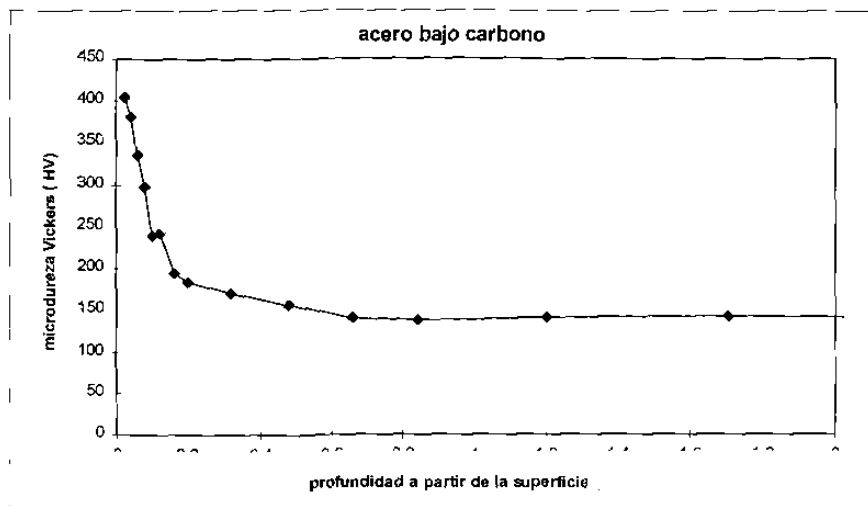


Figura 4.15. Comportamiento de la micro dureza en la sub superficie de los aceros, (a) A106 grado B, (b) A335 tipo P-22 y (c) AISI 304, después de la prueba de planta piloto.

## 4.4 CORROSION.

Para cumplir el objetivo de estudiar el mecanismo de desgaste químico, se obtuvo la información cuantitativa de la pérdida de material en las diferentes aleaciones. Como uno de los principales resultados encontrados se tiene la evaluación de los diversos recubrimientos metálicos en diferentes atmósferas. En esta sección se darán los resultados de los aceros comerciales y del recubrimiento R1 que estuvieron sometidos a una atmósfera reductora.

### 4.4.1 Cambio de masa por unidad de área.

La evaluación cuantitativa fue determinada como el cambio de masa por unidad de área total de los cupones de los materiales utilizados. En la Tabla 4.3 se presentan estos resultados. Para los aceros A106 y P22 se tiene un cambio de masa mayor que para el acero inoxidable 304. El recubrimiento R1 no se ve afectado en la prueba de corrosión a la temperatura de 700°C.

Tabla 4.3. Resultados de las pruebas de corrosión.

<b>Aleaciones</b>	<b>Cambio de masa por unidad de área (mg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Profundidad de carburización (mm)</b>
Acero bajo carbono	-14.9	1.0
A335 grado P-22	-14.9	1.0
Acero inoxidable AISI 304	-7.4	0.75
Aleación de recubrimiento duro R1	0	0

#### 4.4.2 Observaciones microestructurales.

La figura 4.16 muestra una fotomicrografía de una probeta de la aleación del recubrimiento duro R1 en un metal base de acero bajo carbono después de la prueba de corrosión. A la izquierda está el acero bajo carbono y a la derecha el recubrimiento. Sobre el recubrimiento no hay evidencia de daño superficial, carburización o “metal dusting”. Sin embargo, el acero bajo carbono muestra una capa de “metal dusting” alrededor de 60  $\mu\text{m}$  de profundidad (en el lado izquierdo). Observaciones similares fueron encontradas en el acero P-22 y en menor grado en el acero inoxidable 304.

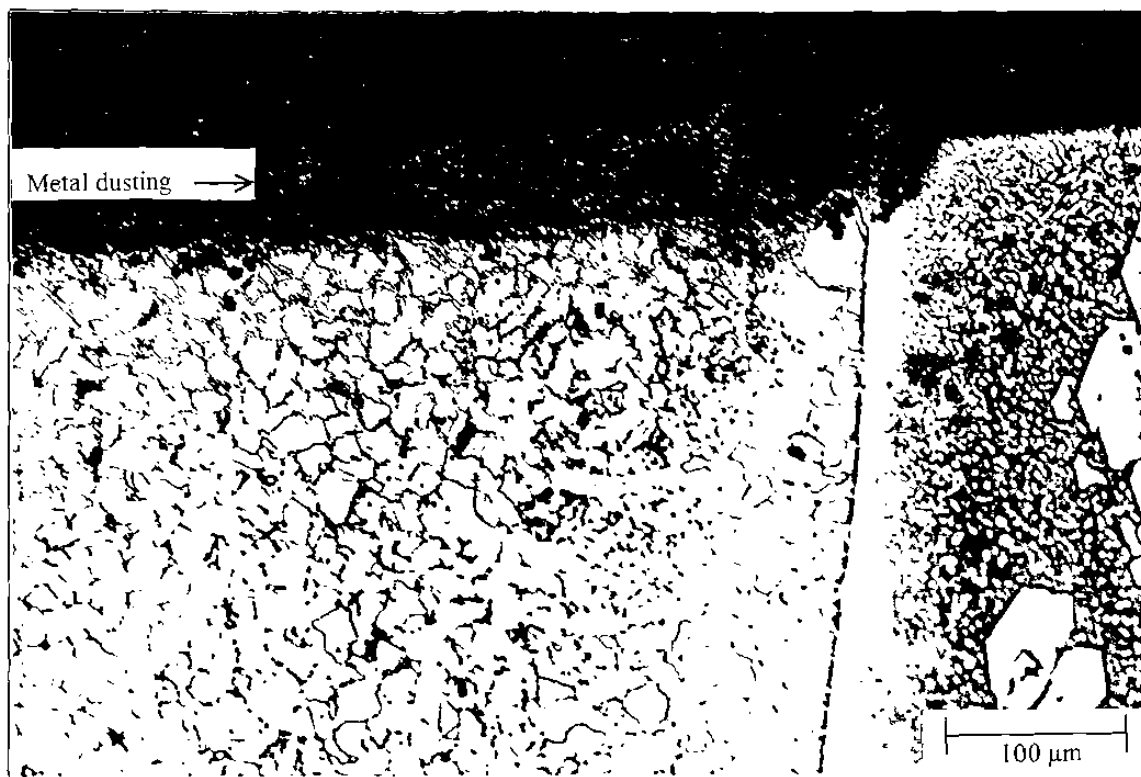


Figura 4.16 Microestructura de la unión del acero bajo carbono, izquierda, atacado químicamente, como metal base del recubrimiento metálico R1, donde no se observa desgaste químico. 200x.

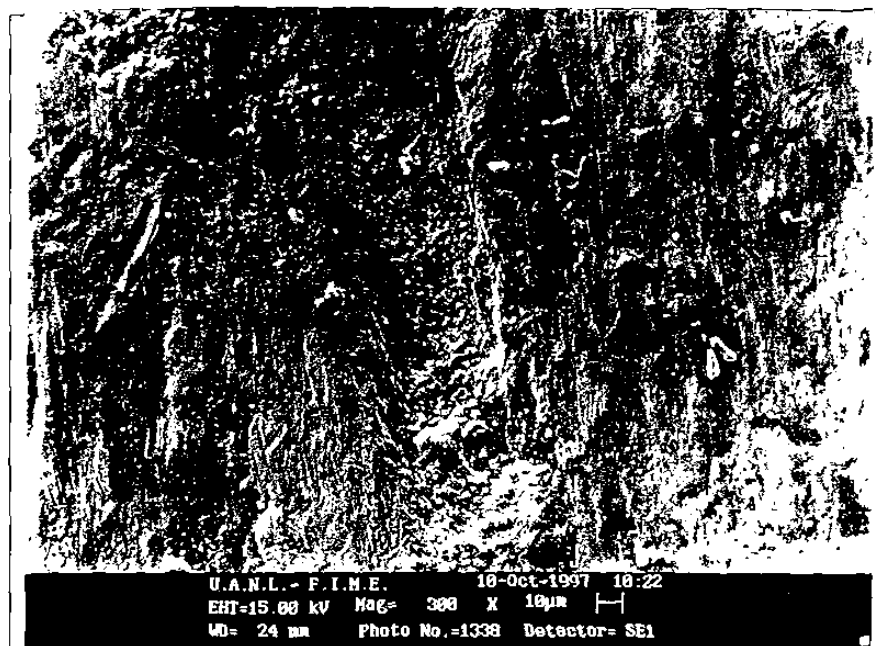


## 4.5 MAQUINA DE DESGASTE.

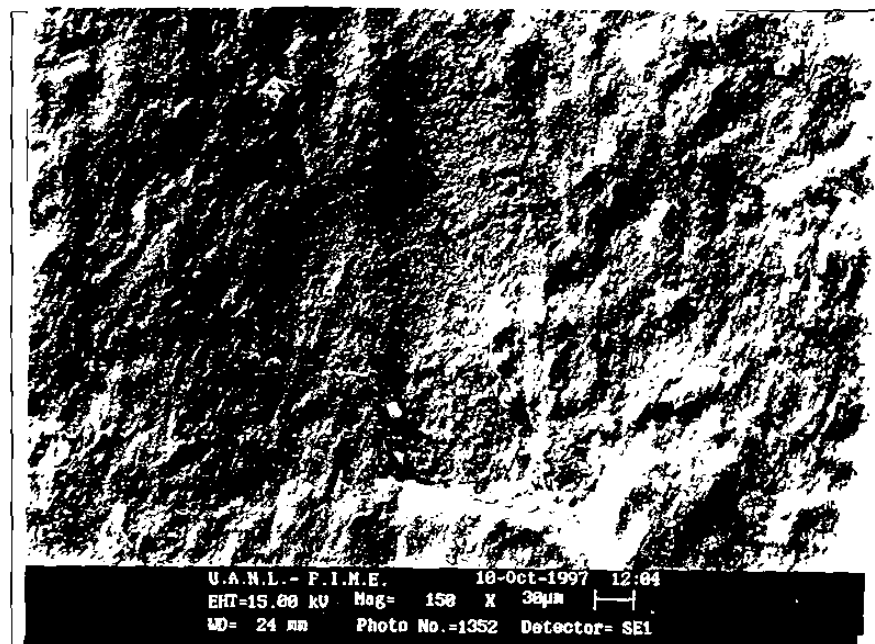
En esta prueba realizada se encontró y se evaluó el mecanismo de desgaste mecánico principal. Se determinaron correlaciones empíricas para evaluar diferentes aleaciones de recubrimientos metálicos, como opción de aplicación en el proceso de transporte neumático. En base al volumen de desgaste encontrado se realizó como primera aproximación un escalamiento a la tubería de la planta industrial.

### 4.5.1 Observaciones superficiales.

Como primeros resultados se obtuvieron las imágenes de las superficies sometidas a impacto a los ángulos de  $0^\circ$  y  $30^\circ$  (paralelo y con respecto al flujo de sólidos, respectivamente), donde se realiza una comparación cualitativa del daño entre los diferentes aleaciones utilizadas. En la figura 4.17, se observa al acero inoxidable 304, para el ángulo de  $0^\circ$  (a) y a  $30^\circ$  (b). En estas figuras se observa la magnitud del área dañada con una alta deformación plástica. A  $0^\circ$  de impacto se tiene menor daño en la superficie que para el ángulo de impacto de  $30^\circ$ . Para el recubrimiento R1, figura 4.18, se tiene el mismo comportamiento de desgaste, pero con menor daño. En el Apéndice D se tiene las imágenes para el resto de las aleaciones de recubrimientos metálicos, en las cuales se observa la misma tendencia en el comportamiento al desgaste mecánico de las dos primeras aleaciones mencionadas. En la figura 4.17 (a) se muestra al acero inoxidable 304 que fue colocado paralelo al flujo después de 2800 kg. de partículas impactadas. Los impactos producen surcos sobre la superficie. La dirección del flujo en el surco observado es de la parte superior a la inferior. Existe una clara evidencia de la deformación plástica al frente de la marca del surco y de material removido. En el fondo del impacto se pueden observar marcas de desgarramiento del material. La figura 4.17 (b) muestra al acero inoxidable 304 a  $30^\circ$ , el daño observado sobre la superficie parece ser mayor que el encontrado en la posición paralela al flujo de partículas en el mismo acero. También se observa mayor deformación plástica y marcas menores de desgarramiento.



(a)



(b)

Figura 4.17. Desgaste en la superficie del acero 304 (a) a  $0^\circ$  paralelo al flujo de sólidos y (b) a  $30^\circ$  con respecto al flujo.

La figura 4.18 (a) muestra una aleación de recubrimiento duro R1, paralelo al flujo después de 11, 160 kg. de partículas impactadas. Muy poco daño fue observado y se presentó únicamente en la matriz. Los carburos primarios protegen efectivamente la superficie del desgaste. En la figura 4.18 (b) se observa la aleación de recubrimiento

duro R1 a  $30^\circ$  después de 11,160 kg. Puede ser observado un mayor daño en la superficie. Es claro que las partículas erosionan a la matriz suave, dejando aislados a los carburos primarios, hasta que se vuelven partículas sueltas.



(a)



(b)

Figura 4.18. Desgaste en la superficie del recubrimiento R1 (a) a  $0^\circ$  paralelo al flujo de sólidos y (b) a  $30^\circ$  con respecto al flujo.

#### 4.5.2 Cálculo del volumen de desgaste.

A partir de la evaluación del área y profundidad promedio de desgaste, descrito en el procedimiento experimental, se determinó el volumen de desgaste normalizado en las aleaciones utilizadas a diferentes ángulos de impacto. En las Tablas 4.4 y 4.5, se dan los datos cuantitativos del área, profundidad, carga transportada y el volumen de desgaste normalizado para los diferentes ángulos de impacto. En el Apéndice E, se dan los datos y la validación estadística descrita en el procedimiento experimental.

Tabla 4.4. Valores cuantitativos del volumen de desgaste erosivo a 0°.

Aleaciones	Area de desgaste Ad (mm <sup>2</sup> )	Profundidad hc (mm)	Volumen Vd (mm <sup>3</sup> )	Carga transportada mt (kg)	Volumen normalizado Vd /mt X 10 <sup>-4</sup> (mm <sup>3</sup> /kg)
INOX	176.52	0.008	1.41	2800	5.04
R1	37.84	0.0026	0.098	11160	0.088
R2	89.00	0.004	0.356	2800	1.2
R3	150.00	0.0078	1.17	2800	4.17
R4	181.73	0.0059	1.07	2800	3.82
R5	24.58	0.0044	0.108	2800	0.386
R6	96.00	0.0061	0.585	960	6.1
R7	24.38	0.0047	0.114	960	1.18

Tabla 4.5. Valores cuantitativos del volumen de desgaste erosivo a 30°.

Aleaciones	Area de desgaste Ad (mm <sup>2</sup> )	Profundidad hc (mm)	Volumen Vd (mm <sup>3</sup> )	Carga transportada mt (kg)	Volumen normalizado Vd /mt X 10 <sup>-3</sup> (mm <sup>3</sup> /kg)
INOX	330.21	0.026	8.58	2800	3.06
R1	84.00	0.0075	0.63	11160	0.056
R2	104.53	0.0087	0.9	2800	0.32
R3	194.00	0.012	2.33	2800	0.832
R4	285.84	0.021	6	2800	2.14
R5	107.96	0.0095	1.02	2800	0.366
R6	344.00	0.0129	4.43	960	4.62
R7	80.29	0.0038	0.305	960	0.317

#### 4.5.3 Relaciones de desgaste vs. parámetros microestructurales.

Una vez calculado el volumen normalizado de desgaste mecánico en la prueba de la máquina de desgaste, se determinaron las correlaciones con los parámetros de microestructura y dureza de las aleaciones especiales. Lo anterior con el fin de encontrar relaciones empíricas que expliquen la resistencia relativa al desgaste de los diferentes recubrimientos metálicos. En las figuras 4.19 y 4.20, se observan los gráficos del volumen de desgaste por carga transportada contra los parámetros microestructurales para los ángulos de  $0^\circ$  y  $30^\circ$ .

Para el ángulo de  $0^\circ$  (paralelo al flujo de sólidos) de impacto, figura 4.19 (a) se presenta la relación entre el volumen de desgaste contra la fracción volumétrica de carburos de las aleaciones. En esta figura se puede apreciar que no existe una relación directa con este parámetro. La distribución en la fracción volumétrica de carburos varía entre 27 y 43%, sin embargo el desgaste no tiene una correlación con este parámetro. En la figura 4.19 (b) observamos el comportamiento del desgaste contra el parámetro de la trayectoria media libre entre carburos y matriz. Se puede observar que existe una relación de orden potencial con una correlación de 0.80. En la figura 4.19 (c) tenemos el parámetro de espaciamiento entre carburos, donde observamos también una relación de potencia con el desgaste, con una correlación del 0.84. La relación entre la trayectoria media libre ( $\lambda$ ) y el espaciamiento entre carburos ( $\sigma$ ) es una línea recta (ver figura 2B, Apéndice B). En la figura 4.19 (d) se observa el comportamiento del desgaste con la dureza, como propiedad mecánica de los materiales. Se observa que no existe una relación directa de la resistencia al desgaste con la dureza.

La magnitud de desgaste encontrado en los materiales, a ángulos muy pequeños, es de  $10^{-4}$ , esto es una magnitud frecuente en pruebas de desgaste erosivo para metales dúctiles [IR].

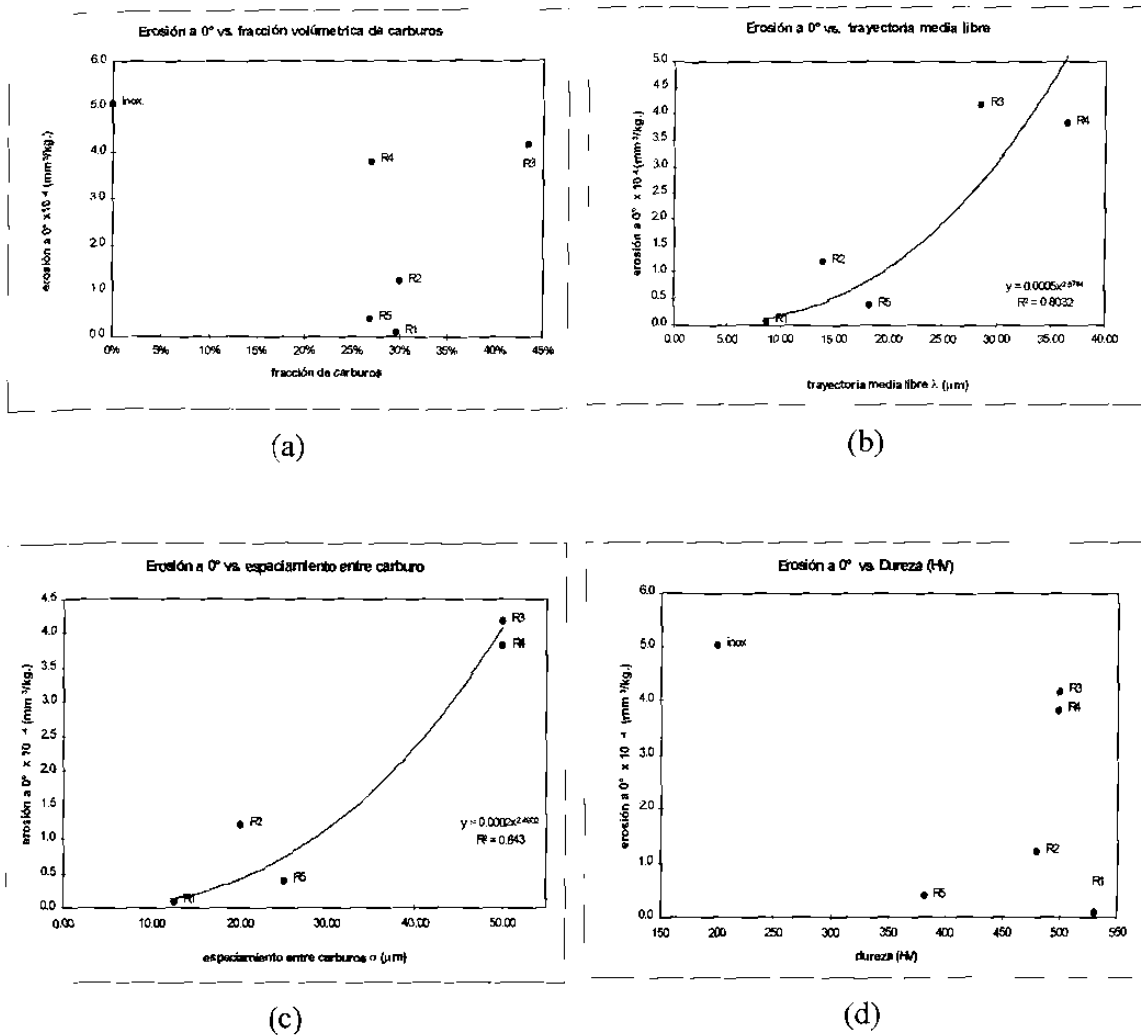


Figura 4.19. Gráficas de volumen de desgaste a 0° contra: (a) fracción volúmetrica de carburos, (b) trayectoria media libre, (c) espaciamiento entre carburos y (d) dureza de los recubrimientos.

Las relaciones para el ángulo de 30°, se ven en la figura 4.20, donde se gráficas los resultados del volumen de desgaste contra: (a) fracción volúmetrica de carburos, donde no existe una relación directa, al igual que el caso de erosión a 0°. Para el resto de los parámetros, observamos en (b), (c) y (d), donde se tiene el mismo comportamiento de la figura 4.19. Se observa que existen correlaciones con los parámetros de microestructura  $\lambda$  y  $\sigma$ , la magnitud del desgaste a 30° es de un orden en magnitud mayor

que el encontrado para el ángulo de  $0^\circ$ , como se describen los datos en las Tablas 4.4 y 4.5.

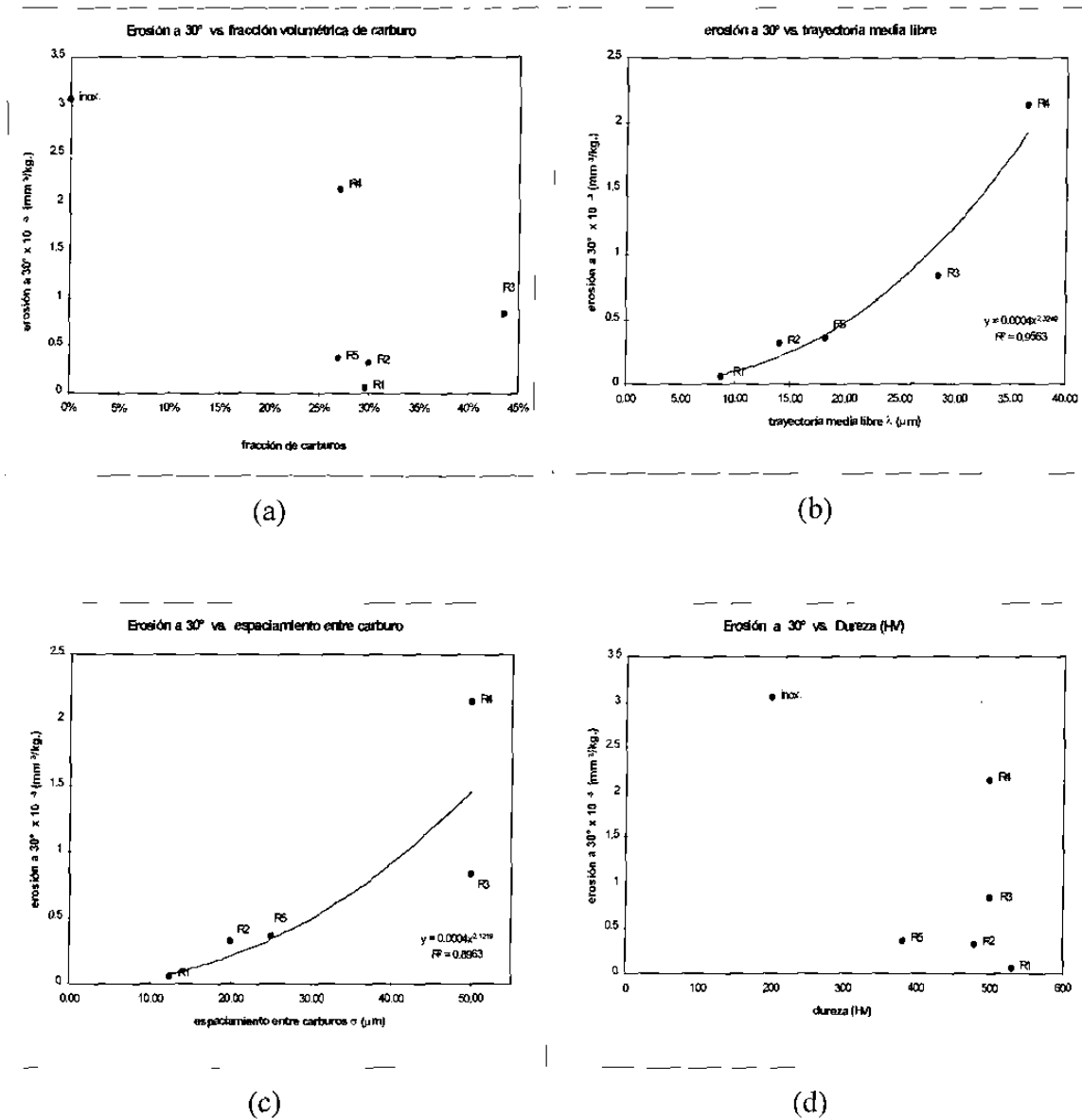


Figura 4.20. Gráficas de volumen de desgaste a  $30^\circ$  contra: (a) fracción volumétrica de carburos, (b) trayectoria media libre, (c) espaciamiento entre carburos y (d) dureza de los recubrimientos.

Las correlaciones del desgaste y los parámetros microestructurales fueron las siguientes:

Erosión a 0°:

$$1.- E = 0.0005 \lambda^{2.58}$$

con una correlación de:  $R^2 = 0.80$

$$2.- E = 0.0002 \sigma^{2.49}$$

con una correlación de:  $R^2 = 0.84$

Erosión a 30°:

$$1.- E = 0.0004 \lambda^{2.32}$$

con una correlación de:  $R^2 = 0.95$

$$2.- E = 0.0004 \sigma^{2.12}$$

con una correlación de:  $R^2 = 0.89$

Evaluando las correlaciones encontradas para el desgaste con los parámetros microestructurales, se probaron experimentalmente (en la máquina de desgaste, ver sección 3.5) dos aleaciones de la familia de recubrimientos metálicos (R6 y R7, los resultados experimentales se muestran en las Tablas 4.4 y 4.5) con los siguientes datos de parámetros microestructurales: para R6 se tiene  $\lambda = 32 \mu\text{m}$  y  $\sigma = 50 \mu\text{m}$ ; para R7 los parámetros son:  $\lambda = 20 \mu\text{m}$  y  $\sigma = 33 \mu\text{m}$ . La Tabla 4.6, muestra los resultados de la experimentación y de la correlación, en la cual podemos comparar la aproximación y el margen de error de las correlaciones.

Tabla 4.6. Evaluación de la correlación de desgaste vs. parámetros microestructurales.

Aleaciones	desgaste normalizado Vd/mt EXPERIMENTAL (mm <sup>3</sup> /kg)	desgaste normalizado CORRELACIÓN (mm <sup>3</sup> /kg)
A 0°		
R6	$6.1 \times 10^{-4}$	$3.82 \times 10^{-4}$
R7	$1.18 \times 10^{-4}$	$1.14 \times 10^{-4}$
A 30°		
R6	$4.62 \times 10^{-3}$	$1.24 \times 10^{-3}$
R7	$0.317 \times 10^{-3}$	$0.41 \times 10^{-3}$



## 4.6 ESCALAMIENTO A UNA TUBERÍA DE PLANTA INDUSTRIAL.

En base a los resultados obtenidos en la prueba de máquina de desgaste y de la planta piloto, con respecto a la profundidad de desgaste por carga transportada, se realizó una primera aproximación para determinar el tiempo promedio para desgastar 2 mm de espesor de una capa de recubrimiento de 6.35 mm de espesor, en una tubería de 30 cm (12 pulgadas) de diámetro nominal, con una razón de flujo de sólidos de 80 toneladas por hora. La metodología fue descrita en el procedimiento experimental. Los datos experimentales y calculados para el acero inoxidable 304 en los diferentes ensayos se presentan en la Tabla 4.7, donde se aplican los factores de proporcionalidad.

Tabla 4.7. Valores de escalamiento de carga de transporte y tiempo de desgaste erosivo, en el acero inoxidable 304 en posición horizontal.

Aleación AISI 304	carga transportada (toneladas)			factor de proporción
	para $h_d = 0.008$ mm	para $h_d = 0.03$ mm	para $h_d = 2$ mm	
probeta en máquina de desgaste	2.8	10.5 *	700 *	1
tubo de 10.16 cm (4")	32 *	120	8000 *	11.42 veces
tubo de 30.48 cm (12")	53.6 *	201 *	13400	19.14 veces
tiempo para obtener $h_d$ en tubo de (12")	0.67 * hrs.	2.5 * hrs.	7 * días	

Tabla 4.8. Correlación entre el acero inoxidable 304 y R1 en posición horizontal.

Aleación R1 12.26 veces mayor que el AISI 304	carga transportada (toneladas)			factor de proporción
	para $h_d = 0.002$ mm	para $h_d = 0.03$ mm	para $h_d = 2$ mm	
probeta en máquina de desgaste	11.16	128.76 *	8584.61 *	1
tubo de 10.16 cm (4")	1562.5 *	18027.58 *	1201924.4 *	11.42 veces
tubo de 30.48 cm (12")	2618.76 *	30214.358 *	2014433.7 *	19.14 veces
tiempo para obtener $h_d$ en tubo de (12")	1.36* días	15.73* días	2.87* años	

$h_d$ : profundidad de desgaste. \*: valores calculados. Valores resaltados son datos experimentales.

El mismo procedimiento se sigue para el resto de los recubrimientos metálicos, pero en nuestro estudio el recubrimiento R1 presenta mayor resistencia, así que se elige para realizar el escalamiento en la planta industrial.

En la figura 4.21, se representan los datos de la Tabla 4.7, donde se observan las diferentes pendientes que se obtienen en los tres ensayos realizados de transporte de peléts de HRD para el acero inoxidable. En esta gráfica podemos observar que la razón de desgaste de la máquina de erosión es mayor que para las otras pruebas de planta piloto y planta industrial. Donde podemos asegurar que el factor de proporcionalidad de la planta piloto es de 11 veces menor que la máquina de erosión y en el caso de la planta industrial de 19 veces menor.

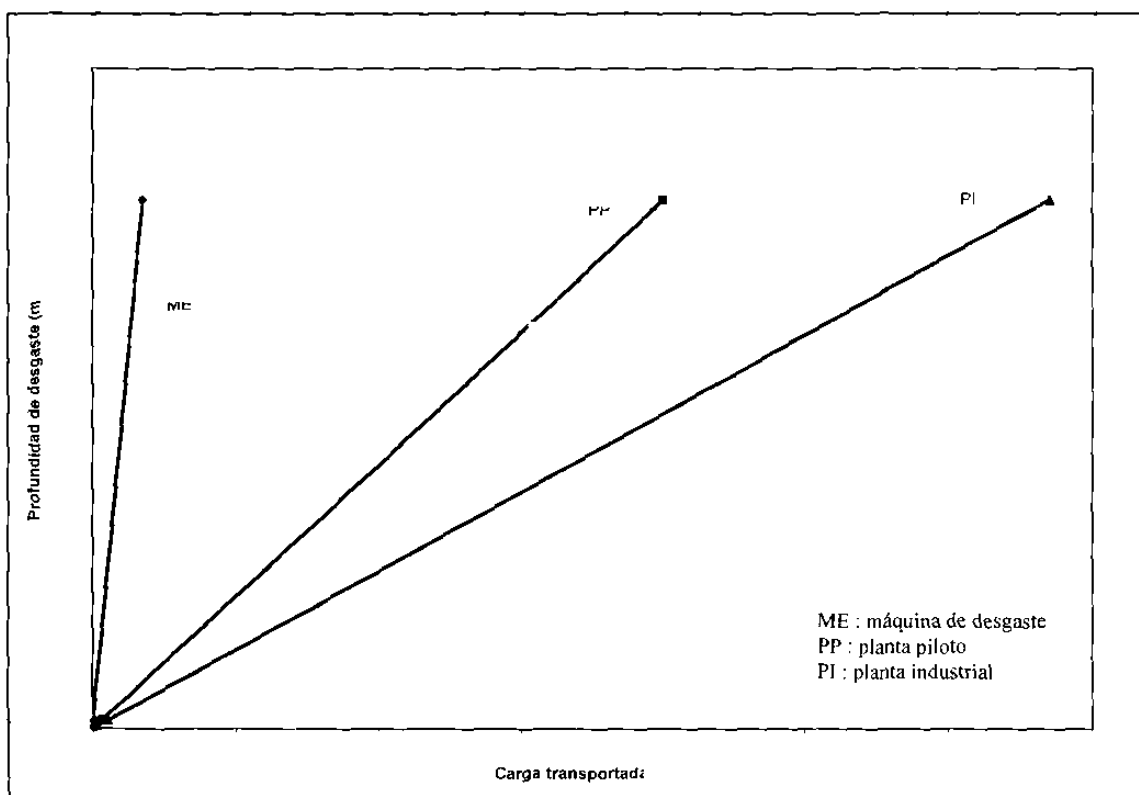


Figura 4.21. Gráfica de los valores de la profundidad de desgaste en los tres ensayos realizados con el acero inoxidable.

En la Tabla 4.7 se representan los valores experimentales con números resaltados. Se calcula la cantidad de toneladas equivalentes necesarias (valores con \*) para obtener una profundidad de desgaste (hd) determinada. En la última columna se toma como valor unidad a la probeta en la máquina de desgaste y se calcula el factor de proporción. Este valor nos indica que tan severa es una prueba con respecto a la otra. Así, la máquina de desgaste es aproximadamente 10 veces más severa que la planta piloto y 20 veces más severa que la planta industrial. Así mismo, en la Tabla 4.6, en la última fila se representa el tiempo equivalente necesario para ocasionar una profundidad de desgaste (hd) determinada.

En la Tabla 4.8, se representan los valores de la correlación entre el acero inoxidable 304 y el recubrimiento R1. De la sección 4.5.2 y Tabla 4.4, se puede determinar la correlación entre estos materiales, dándonos un factor de 12.26. Es decir, para igual profundidad de desgaste, se requiere de 12.26 veces más carga transportada en el recubrimiento R1 que en el acero inoxidable 304. Este es nuestro punto de partida para el escalamiento de este recubrimiento.

De las mismas relaciones entre diferentes pruebas y aplicando la relación entre el acero inoxidable 304 y el recubrimiento R1, se construye la Tabla 4.8. En la última fila se dan los tiempos necesarios para ocasionar una profundidad de desgaste hd determinada. En conclusión, se puede apreciar que una tubería recubierta con la aleación R1, requerirá de 2 millones de toneladas transportadas para ocasionar un desgaste de profundidad igual a 2 mm. Conservando la relación de carga transportada por unidad de tiempo igual a 80 toneladas por hora, este desgaste de 2 mm ocurrirá en aproximadamente 2.9 años. En la figura 4.22 se representan los valores para el recubrimiento R1.

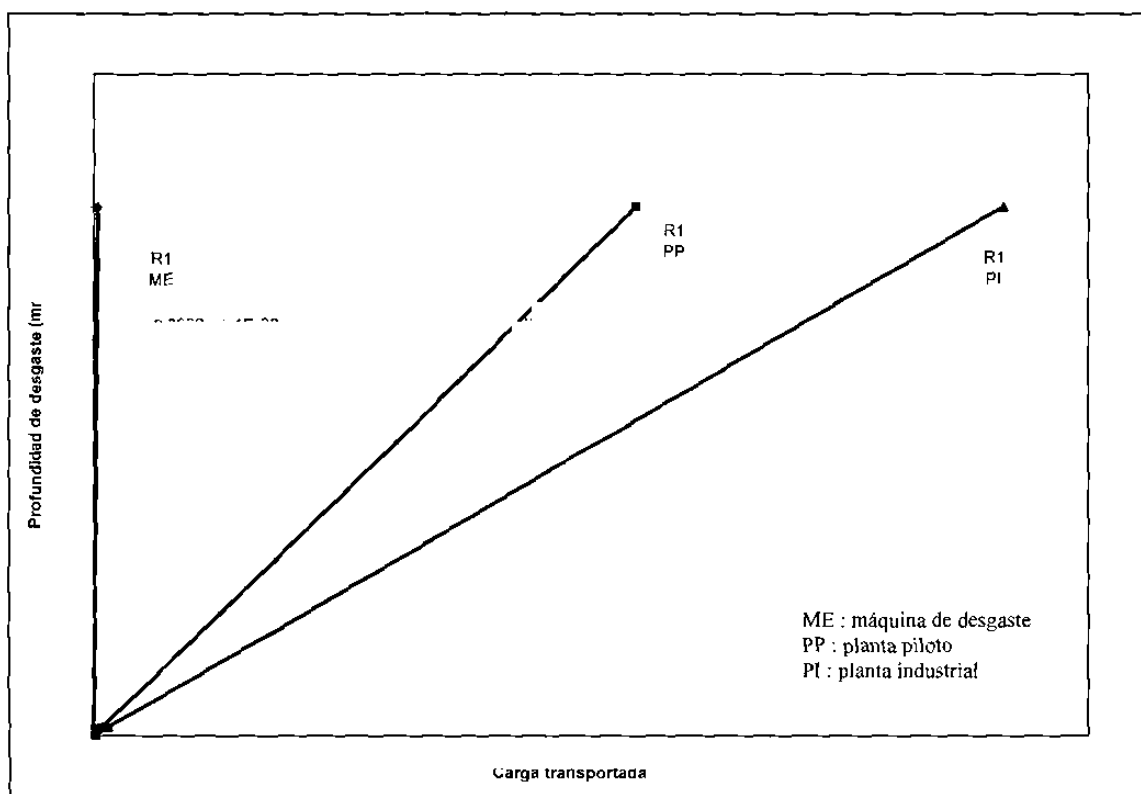


Figura 4.22. Gráfica de los valores de la profundidad de desgaste en los tres ensayos realizados para el caso del recubrimiento R1.

#### 4.7 MODELO EROSIVO DE DESGASTE.

El mecanismo de desgaste mecánico principal encontrado en las pruebas de planta piloto y en la máquina de desgaste es el erosivo, para los materiales suaves, donde la matriz (ferrita, perlita y austenita) es dúctil, el daño es mayor, como lo observamos en los aceros de bajo carbono y en el acero inoxidable. Lo anterior concuerda con los resultados obtenidos en trabajos anteriores [1R, 2R]. Al estudiar los recubrimientos metálicos, que contienen una estructura compleja, debido a su composición química y proceso de obtención, se encontró una mayor resistencia al desgaste. A continuación se describe el modelo de erosión que actúa en estos materiales. En la figura 4.23, se esquematiza las fuerzas que actúan en una matriz dúctil con carburos complejos de diferente morfología.

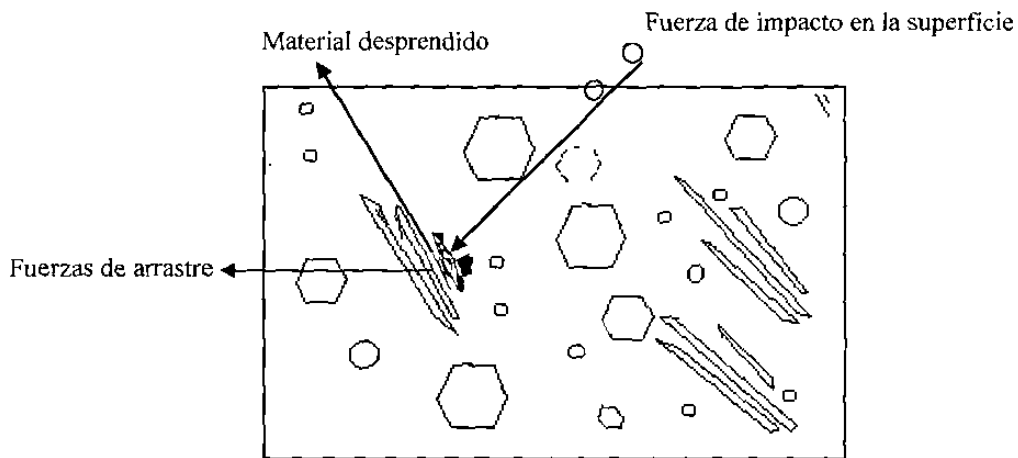


Figura 4.23. Esquema del desgaste erosivo en la estructura de recubrimientos metálicos.

El mecanismo de desgaste erosivo en estas estructura es el siguiente. Se inicia con un período de incubación de energía de impacto en la matriz suave, donde después se inicia la deformación plástica y ocurre un endurecimiento de la superficie del material. Al acumularse la deformación plástica y alcanzar el punto de ruptura del material, se inicia la remoción de partículas y en algunos casos desgarramiento del material en zonas localizadas. Esto dependerá del acabado de la superficie y de la heterogeneidad de la microestructura. La distribución y tamaño de carburos en la matriz influyen en la resistencia al desgaste erosivo donde el número, masa y velocidad de partículas de impacto, son las variables más importantes.

Los parámetros de microestructura, de este tipo de estructuras complejas, participan de una manera fundamental en la resistencia al desgaste. Estas limitan el flujo plástico por trabajado mecánico, donde los carburos impiden el movimiento de las dislocaciones en los planos de deslizamiento, ayudados por las fronteras de grano en la matriz. De esto, es importante la caracterización de los materiales a ser utilizados en las tuberías, ya sea como metal base o como recubrimientos. Esta correlación microestructural debe enfocarse a los parámetros aquí encontrados como son el espaciamiento entre carburos y la trayectoria media libre.

**Lista de Figuras:**

Figura 4.1. Difractograma del recubrimiento duro R1 (Apéndice A).

Figura 4.2. Difractogramas de los recubrimientos duros (a) R2 y (b) R3 (Apéndice A).

Figura 4.3. Difractogramas de los recubrimientos duros (a) R4 y (b) R5 (Apéndice A).

Figura 4.4. Micrografías de las aleaciones: (a) acero bajo carbono A106, microestructura de ferrita con perlita fina en la frontera, (b) acero A335 tipo P-22, presenta una microestructura con una matriz de ferrita e islas de perlita y (c) acero inoxidable AISI 304, con una microestructura de austenita, antes de desgaste.

Figura 4.5. Micrografía del recubrimiento R1 que presenta una microestructura con una matriz de austenita con carburos complejos primarios y secundarios.

Figura 4.6. Micrografía del recubrimiento R2 que presenta una microestructura con una matriz de austenita con presencia de ferrita con carburos primarios y secundarios.

Figura 4.7. Micrografía del recubrimiento R3 que presenta una microestructura con una matriz de ferrita y zonas de martensita con carburos primarios.

Figura 4.8. Micrografía del recubrimiento R4 que presenta una microestructura con una matriz de ferrita y áreas de martensita con carburos primarios y secundarios.

Figura 4.9. Micrografía del recubrimiento R5 que presenta una microestructura con una matriz de fase austenita con carburos complejos primarios y secundarios.

Figura 4.10. Gráfica de pérdida de espesores para los aceros estudiados en planta piloto.

Figura 4.11. (a) acero bajo carbono A106 - B, (b) acero A335 P-22 y (c) acero inoxidable AISI 304, después de ser sometidos a la prueba de la planta piloto.

Figura 4.12. Desgaste en la microestructura del acero A106.

Figura 4.13. Desgaste en la microestructura del acero A335 P-22.

Figura 4.14. Microestructura del acero inoxidable 304, después de ser sometido a la prueba de desgaste en planta piloto.

Figura 4.15. Comportamiento de la micro dureza en la sub superficie de los aceros, (a) A106 grado B, (b) A335 tipo P-22 y (c) AISI 304, después de la prueba de planta piloto.

Figura 4.16. Microestructura de la unión del acero bajo carbono, izquierda, atacado químicamente, como metal base del recubrimiento metálico R1 donde no se observa desgaste químico.200x.

Figura 4.17. Desgaste en la superficie del acero 304 (a) a 0° paralelo al flujo de sólidos y (b) a 30° con respecto al flujo.

Figura 4.18. Desgaste en la superficie del recubrimiento R1 (a) a 0° paralelo al flujo de sólidos y (b) a 30° con respecto al flujo.

Figura 4.19. Gráficas de volumen de desgaste a 0° contra: (a) fracción volumétrica de carburos, (b) trayectoria media libre, (c) espaciamiento entre carburos y (d) dureza de los recubrimientos.

Figura 4.20. Gráficas de volumen de desgaste a 30° contra: (a) fracción volumétrica de carburos, (b) trayectoria media libre, (c) espaciamiento entre carburos y (d) dureza de los recubrimientos.

Figura 4.21. Gráfica de los valores de la profundidad de desgaste en los tres ensayos realizados con el acero inoxidable.

Figura 4.22. Gráfica de los valores de la profundidad de desgaste en los tres ensayos realizados para el caso del recubrimiento R1.

Figura 4.23. Esquema del desgaste erosivo en la estructura de recubrimientos metálicos.

### **Lista de Tablas:**

Tabla 4.1. Fases presentes en los recubrimientos.

Tabla 4.2. Parámetros microestructurales de los recubrimientos metálicos.

Tabla 4.3. Resultados de las pruebas de corrosión.

Tabla 4.4. Valores cuantitativos del volumen de desgaste erosivo a 0°.

Tabla 4.5. Valores cuantitativos del volumen de desgaste erosivo a 30°.

Tabla 4.6. Evaluación de la correlación de desgaste vs. parámetros microestructurales.

Tabla 4.7. Valores de escalamiento de carga de transporte y tiempo de desgaste erosivo, en el acero inoxidable y R1 en posición horizontal.

Tabla 4.8. Correlación entre el acero inoxidable 304 y R1 en posición horizontal.

### **REFERENCIAS**

[1R] Martínez D. Dora. Tesis “Desgaste de Aceros Aleados en Sistemas de Transporte Neumático”. Septiembre 1996.

[2R] Deaquino Aguirre Esperanza. Tesis de Maestría “Desgaste en Transporte Neumático”. Septiembre de 1996.

## **CAPÍTULO 5**

### **DISCUSIÓN**

#### **5.1 INTRODUCCION.**

En base a los resultados obtenidos en esta investigación y de los análisis realizados, se discutirá la caracterización de los materiales, el comportamiento de los materiales en planta piloto, ataque corrosivo y máquina de desgaste, haciendo referencia a los antecedentes. Otro tema a discusión es sobre las correlaciones de desgaste, utilizadas para determinar la resistencia al desgaste de otras aleaciones de composición química similar a las estudiadas y por último, el escalamiento de desgaste realizado en la tubería de 30 cm (12 pulgadas) de diámetro de una planta industrial de transporte neumático de peléts de fierro esponja en caliente.

#### **5.2 CARACTERIZACION DE LOS MATERIALES.**

Dentro de la caracterización de materiales, se determinó la constitución de las fases presentes en las aleaciones de recubrimientos duros, donde observamos dos importantes variantes, la matriz de los recubrimientos varía en sus constituyentes y del tipo de carburos presentes en la matriz, son de diferente constitución y morfología. Estos a su vez son de gran importancia en la resistencia al desgaste. Los parámetros microestructurales presentan una correlación con el desgaste erosivo. Esto permite evaluar diferentes materiales de recubrimientos metálicos para una misma aplicación: el transporte neumático de partículas.



### 5.2.1 Difracción de rayos X.

La determinación de fases en la microestructura de los diferentes recubrimientos metálicos, da un análisis cualitativo de ellas, donde lo más importante es ver la intensidad de estas fases presentes en relación con la matriz del material. De esta forma se puede tener presente una matriz similar, pero con carburos compuestos primarios y secundarios diferentes, esto es, debido a la composición química y forma de obtención de la aleación. En el caso del recubrimiento R1, donde el proceso de obtención es por medio de aplicación de soldadura, el enfriamiento es relativamente rápido y se presenta una matriz austenítica con una diversidad de carburos complejos.  $(Cr, Fe)_7C_3$  (estructura hexagonal compleja) estable a altas temperaturas.  $Cr_{23}C_6$  (estructura cúbica centrada en las caras compleja) y  $Fe_3C$  (compuesto intersticial metaestable, donde la estructura cristalina es ortorrómbica) carburo duro, por lo tanto frágil. La intensidad para la fase  $M_7C_3$ , es mayor que los demás carburos y por lo tanto existe una mayor proporción de este tipo de carburos en la matriz del R1, por lo que podemos esperar la estabilidad de este carburo a altas temperaturas, por su constitución química, como se observa en el diagrama de fases Fe-Cr-C, figura 5.1 [1D].

Para el recubrimiento R2, que se obtiene por soldadura aplicado a un metal base, con un enfriamiento rápido, se tiene una matriz que está formada por austenita, fase dúctil de dureza media, con la presencia de ferrita, fase de mayor ductilidad y menor dureza. Se detecta la fase martensita, con lo que podemos deducir un incremento en la fragilidad de la matriz en las zonas donde esté presente, combinado con la inestabilidad de esta fase martensita a altas temperaturas. Los diferentes carburos existentes son, de mayor a menor intensidad  $Fe_3C$ ,  $Mo_{12}Fe_{22}C_{10}$  y el  $Cr_{23}C_6$ . El carburo  $Fe_3C$ , de nuevo presentará problemas, puesto que es duro y frágil, los carburos  $Mo_{12}Fe_{22}C_{10}$  y  $Cr_{23}C_6$ , se comportarán en forma estable a altas temperaturas.

El recubrimiento R3, es una fundición blanca con alto contenido de cromo, donde la forma de obtención de esta aleación en tubería, es por medio del proceso de centrifugación, donde el enfriamiento es más rápido que para una soldadura. Este material presenta una matriz de martensita y carburos  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ , en mayor intensidad. De la constitución de la matriz de este material, y por su dureza alta (500 HV) se comportará frágil al impacto, además de poseer inestabilidad a altas temperaturas.

Para el recubrimiento metálico R4, que es también una aleación de fundición blanca, con variantes en la composición química, donde presenta una matriz de austenita, con una alta cantidad de carburos  $\text{Fe}_3\text{C}$  en la matriz, por lo que, esperamos fragilidad al impacto. Se detecta los carburos de molibdeno ( $\text{Mo}_2\text{C}$ ), donde estos carburos son estables a altas temperaturas y están distribuidos uniformemente en la matriz. El recubrimiento R5, es una fundición blanca con alto cromo y molibdeno, también es obtenida en el proceso de centrifugación, por lo que se retiene la fase austenita en la matriz, el carburo ( $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ) está presente con una alta intensidad, al igual que el carburo ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ), pero al compararla con el R1, se presenta en menor proporción, de hecho en todas las fases ( $\gamma$ ,  $\text{Fe}_3\text{C}$ ) ocurre lo mismo.

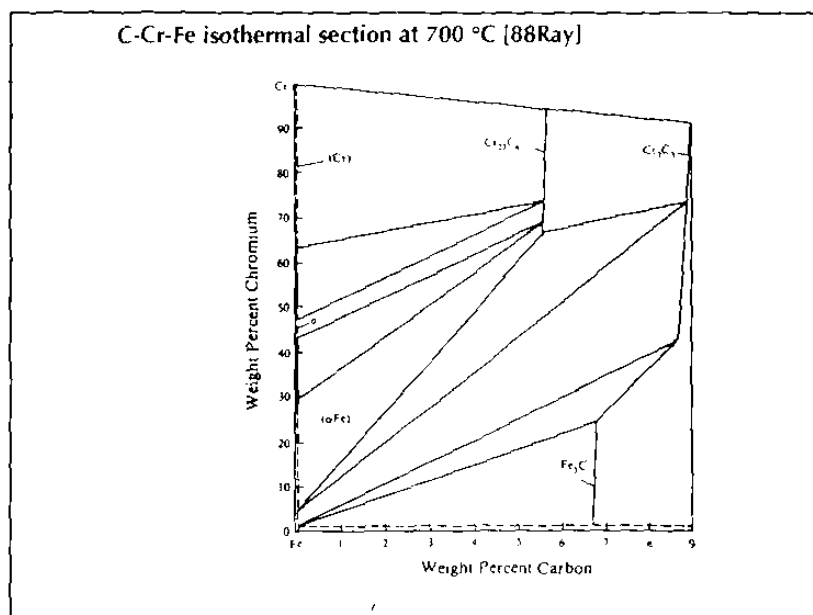


Figura 5.1. Diagrama de fases Fe - Cr - C, según [1D].

### **5.2.2 Análisis metalográfico.**

Con las microestructuras obtenidas a diferentes magnificaciones, se observó la diferencias en la morfología, distribución, tamaños y separación entre los diferentes carburos embebidos en la matriz, ya fuera en austenita, ferrita o martensita. Con la ayuda de esta herramienta se encontró información para determinar los parámetros de microestructura de los materiales.

### **5.2.3 Parámetros microestructurales.**

Los parámetros de estructura: fracción volumétrica de carburos, espaciamiento entre carburos y trayectoria media libre entre carburo y matriz, son relacionados en las pruebas de desgaste mecánico realizadas, donde se observó una buena correlación y se establecieron límites de validación (se discutirá en la prueba de desgaste mecánico). Los valores encontrados para los diferentes parámetros, presentan diferencias en magnitud en los recubrimientos metálicos (ver Tabla 4.2) y corresponden a las observadas en las micrografías, esto es, debido a la composición química y al proceso de obtención.

Al someter los materiales a un enfriamiento rápido, se encuentra una distribución de carburos en forma de dendritas, donde el espacio entre estos carburos es grande en comparación de carburos con una distribución más uniforme en la matriz. El tener carburos primarios y carburos secundarios finos complejos distribuidos uniformemente en la matriz, reduce la trayectoria media libre entre carburo y matriz. La morfología de los diferentes carburos juega un papel importante en la resistencia al desgaste, como se observó en la superficie de los recubrimientos metálicos.

## **5.3 PLANTA PILOTO.**

### **5.3.1 Medición de espesores.**

Los valores mostrados en la gráfica 4.10 y cuyo análisis se encuentra en el Apéndice C, no toman en cuenta la formación de una capa de óxido, dado que la capa no es uniforme, como se muestra en la figura 4.12, sería aventurado suponer la pérdida real de espesor a partir de una simple resta aritmética. Sin embargo, es claro que el acero inoxidable 304 sufrió menor daño, aunque los números en el Apéndice C, no muestran una diferencia significativa. Comparándolo con el comportamiento observado anteriormente [2D] para similares aleaciones comerciales a una temperatura de transporte menor (300°C), el cambio de espesor en las tuberías no sigue un patrón uniforme en las cuatro posiciones, es decir, se esperaría que ocurriera ya que el transporte de sólidos fue en fase diluida. Durante la prueba piloto ocurren cambios de presión, lo que influyen en el cambio de fase, el gran daño químico encontrado en las aleaciones de bajo carbono, es debido al efecto de transportar las partículas con una atmósfera con alto contenido de oxígeno en caliente, durante varias horas, esto ocurre ya que en la planta se prueban con diferentes combinaciones de atmósfera con el gas reductor, ya que está diseñada para experimentar con diferentes parámetros de transporte neumático. La presencia de las picaduras y la capa de óxido dentro de ellas, nos da una idea de los diferentes mecanismos de corrosión que actúan en estas aleaciones.

### **5.3.2 Observación superficial de la tubería y microscópica de la aleación.**

El acero al bajo carbono A106 y el acero P-22 mostraron un daño extensivo, debido a la corrosión por picaduras a alta temperatura. Ver figura 4.11 (a) y (b). Este daño pudo haber borrado algo de daño mecánico (si lo hubiera), producido por las partículas, tales como surcos, deformación plástico y corte. Como esta figura muestra, también existe una capa de óxido sobre la superficie, haciendo difícil estimar la pérdida de espesor real de las paredes de los tubos. En este punto, puede considerarse que el principal daño de la tubería es debido a la corrosión por el gas a altas temperaturas. El

acero inoxidable 304 muestra algo de deformación plástica en la superficie. Como no fue observado daño por corrosión, todo el daño mecánico (erosión) está presente y se le puede suponer como el responsable del mecanismo de daño. En el caso del acero al bajo carbono A106 y el acero P-22, es posible que los granos del acero deformado presenten recuperación o recristalización a la temperatura utilizada en este estudio (580°C). La temperatura de recristalización del acero al bajo carbono es 540°C [3D]. Algunos granos muy pequeños se observan en la superficie y pueden estar relacionados al proceso de recristalización, ver figura 5.2. Las pruebas de erosión a altas temperaturas necesitan ser realizadas con cambios de dureza en ambos, material de tubería y partículas. Se necesita aún representar esta situación para entender el proceso de erosión a alta temperatura. Las ecuaciones actuales no consideran la dureza a altas temperaturas. Una ecuación que pueda representar a la dureza relativa entre partículas y superficie es aún necesaria.

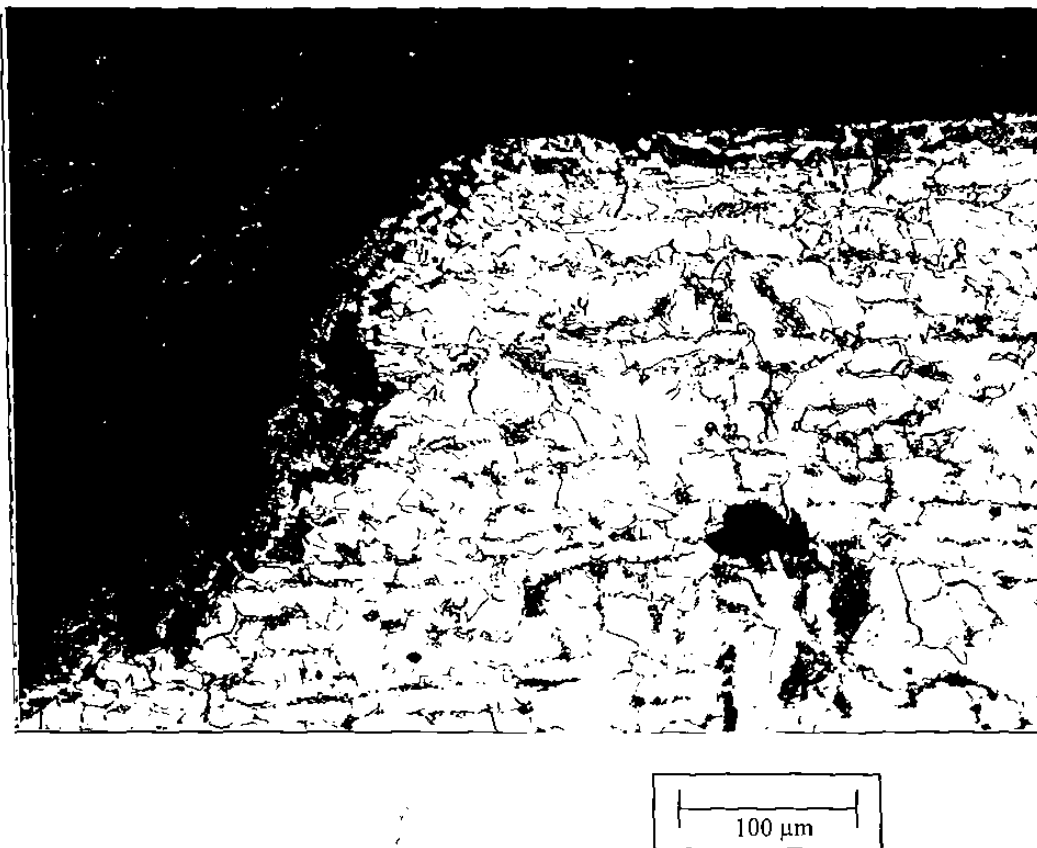


Figura 5.2. Microestructura del acero A106B, con zona de deformación plástica y principio del mecanismo de recristalización.

### **5.3.3 Ensayo de microdureza.**

El comportamiento observado de las microdurezas en los tres aceros comerciales al final de la prueba es similar, existe un incremento en la microdureza en la zona de la subsuperficie hasta una profundidad en promedio de 200  $\mu\text{m}$ , debido al endurecimiento por la deformación plástica que ocurre cuando es impactado a un ángulo de  $0^\circ$  (o paralelamente a la superficie) por el flujo de sólidos, aunque en esta prueba el daño en la subsuperficie de los materiales es difícil de detectar debido a la magnitud de daño químico observado. En la figura 5.2 se muestra una de las zonas dañadas detectadas en la zona sur de la tubería, en ella podemos observar regiones deformadas que presentan recristalización de grano, en estas áreas se realizaron los ensayos de microdureza en los tres aceros.

Realizando una comparación con los incrementos de dureza encontrados en la prueba de transporte a  $300^\circ\text{C}$  [2D], existe una mayor profundidad de endurecimiento en esta prueba de transporte de  $600^\circ\text{C}$ , ya que se transportó más de 3 veces la cantidad de material que en la prueba a  $300^\circ\text{C}$ . Aunque se esperaría, debido a lo anterior, que el daño encontrado fuera de mayor magnitud en esta prueba de  $600^\circ\text{C}$ , esto no ocurre ya que la temperatura es una variable importante en el ablandamiento de los pellets de hierro esponja que realizan el papel de partículas erosivas.

## **5.4 CORROSION.**

### **5.4.1 Cambio de masa por unidad de área.**

Los resultados de la prueba de laboratorio de corrosión fueron como se esperaba. El acero bajo carbono A106 y el acero P-22 mostraron una alta pérdida de material, debido al mecanismo de “metal dusting” [4D]. El acero inoxidable 304 presentó menor daño, casi la mitad de lo mostrado por los aceros bajos carbono y P-22. La aleación del recubrimiento duro no presentó pérdida o deterioro del material, ver Tabla 4.2.

### 5.4.2 Observaciones microestructurales.

En la figura 4.16, se observa el daño por corrosión en atmósferas reductoras, en el acero bajo carbono, se aprecia un daño en el material con una profundidad de 60  $\mu\text{m}$ , con apariencia de porosidad fina, según análisis de EDX, son productos de corrosión, grafito, partículas metálicas y carburos de hierro. En la interfase con la aleación del recubrimiento R1, no se aprecia daño químico, al igual que en la superficie del recubrimiento.

El ataque por corrosión en atmósferas reductoras a la temperatura de prueba (700°C), es debido al mecanismo de carburización catastrófica conocida como “metal dusting”, donde la actividad de carbono es más alta que la del material,  $a_c > 1$ . La presión parcial de oxígeno es del orden de  $10^{-20}$  atmósferas y la presión parcial del metano con respecto al hidrogeno ( $P_{\text{CH}_4}/P_{\text{H}_2}^2$ ) es aproximadamente  $10^{-1}$  atmósferas a 700°C [4D]. El efecto de este tipo de corrosión es más agresivo en las aleaciones de bajo carbono, como la A106 grado B y el acero A335 tipo P-22, el mecanismo consiste en 1) una rápida saturación y supersaturación de carbono en la matriz del metal. 2) formación del carburo metaestable  $\text{M}_3\text{C}$  en la superficie y en las fronteras de grano, donde se facilita la nucleación. 3) el  $\text{M}_3\text{C}$  es únicamente estable a altas actividades de carbono y puede iniciar a descomponerse en el exterior de la superficie, por ejemplo cuando el carbono es depositado localmente de la atmósfera. Aquí la actividad de carbono disminuye a la unidad ( $a_c=1$ ) y la cementita resulta ser inestable a estas condiciones. 4) la descomposición del carburo,  $\text{M}_3\text{C} \rightarrow 3\text{M} + \text{C}$ , conduce a la formación de una mezcla de carbono y partículas metálicas. Las partículas metálicas actúan como catalizadores para el depósito de carbono. 5) Los cambios de volumen asociados con estas transformaciones generan esfuerzos internos altos y subsecuentemente el resultado de la desintegración de la superficie en una mezcla de polvo de carbono con partículas metálicas [5D].

Para las aleaciones altamente aleadas, como en el caso del acero inoxidable austenítico y el recubrimiento R1, el mecanismo deberá iniciar con la falla de la película de óxido protectora y la formación de carburos estables ( $M_7C_3$  y  $M_{23}C_6$ ). Estos carburos internos pueden retardar el metal dusting y causar un tiempo de incubación frecuentemente observado en las aleaciones altamente aleadas. La protección depende de la habilidad de la aleación de formar y conservar la capa de cromo ( $Cr_2O_3$ ). Debido a esto, el recubrimiento metálico con alto contenido de cromo y níquel, además de tener un alto porcentaje de silicio, que tiene la propiedad de formar una película de óxido de silicio ( $Si_2O$ ) que presenta una alta resistencia al metal dusting [4D], presenta una alta resistencia al desgaste químico.

## **5.5 MAQUINA DE DESGASTE.**

La principal característica de esta máquina es que puede ser utilizada para experimentar a diferentes ángulos de impacto. El ángulo de  $0^\circ$  fue usado para representar los tubos horizontales y el ángulo de  $30^\circ$  para los codos. Aunque más experimentación es necesaria para trabajar con diferentes ángulos, es posible realizar la comparación entre estos dos ángulos.

### **5.5.1 Observaciones superficiales.**

Ha sido aceptado que la erosión es una función del ángulo de impacto [6D]. Para metales dúctiles, una alta razón de erosión puede ser encontrada en ángulos cerca de  $30^\circ$ . A ángulos pequeños o ángulos cercanos a  $90^\circ$  se observa menor erosión. La figura 4.17, (a) y (b) muestran estas diferencias. A  $30^\circ$  ( b) el daño superficial es más alto que a  $0^\circ$ . En ambos casos, surcos, deformación plástica y la pérdida de material ocurren pero, a  $30^\circ$  estos son mayores. Esto es debido a la naturaleza de contacto entre partículas y superficie.



### 5.5.2 Cálculo del volumen de desgaste.

Los valores estimados para el volumen de desgaste nos da cuantitativamente las diferencias en el comportamiento al desgaste erosivo de los materiales, en las pruebas de 0° y 30°. En la Tabla 4.4, ensayo a 0°, observamos la magnitud de desgaste del acero inoxidable, que en comparación al R1, es mayor casi 60 veces más. Esto determina la importancia de los carburos complejos embebidos en una matriz de austenita, distribuidos uniformemente y con una distribución de tamaños de carburos. La resistencia al desgaste en el resto de las aleaciones especiales, tomando como referencia al acero inoxidable, no es muy diferente en magnitud de casi todos los recubrimientos, que resisten, en promedio, 4 veces más que el acero inoxidable, a excepciones de algunas aleaciones de fundición blanca, donde el desgaste es cerca de la misma magnitud que el acero inoxidable, esto se debe a que la matriz de estos materiales es de ferrita o martensita, como primer punto ya que estas presentan una alta ductilidad y inestabilidad a altas temperaturas, respectivamente; aparte de esta variable de estructura, se encuentra la distribución y tipo de carburos.

La diferencia entre las pruebas de 0° a 30°, es de un orden de magnitud mayor para el caso del acero inoxidable, R1, R4, R5 y R6, donde la relación entre el desgaste del acero inoxidable (a 30°) y el recubrimiento R1, sigue conservando la razón cercana a 55 veces más desgaste, la explicación de la resistencia al desgaste de este recubrimiento es debida a su constitución en estructura y tipo de carburos complejos embebidos en la matriz. El recubrimiento R5 presenta una buena resistencia en los ensayos de 0° y 30°. Los carburos que protegen efectivamente esta matriz son del tipo de carburos  $M_7C_3$ , los cuales han demostrado ser los que dan más resistencia a la erosión (R1). Los recubrimientos R2 y R7, tienen valores similares en ambos ensayos, a pesar de ser obtenidos en forma distinta (por soldadura y fundición enfriada al aire, respectivamente) pero se tiene carburos de constitución y distribución similares.

Los recubrimientos metálicos R3, R4 y R6 presentan un alto desgaste, casi comparable con el acero inoxidable AISI 304, en ambas pruebas, donde existe una alta densidad de  $Fe_3C$  y presencia de martensita en la matriz, como lo mencionamos, no son fases estables a altas temperaturas, que al disminuir la dureza de éstas, dejan de brindar protección a la matriz. El recubrimiento R6, no tiene una buena resistencia al desgaste, como lo muestran los valores cuantitativos y las observaciones de la superficie, un parámetro de importancia en este material, es la presencia de una alta densidad de poros (fundición) los cuales influyen al incrementar el área de desgaste y la profundidad en las huellas de impacto.

### **5.5.3 Validación estadística.**

En cada evaluación de datos, para la obtención del volumen de desgaste de todas las aleaciones, como la información de áreas y profundidad de desgaste, se obtuvieron las desviaciones estándar, donde se aplica la distribución t para el análisis de la sensibilidad de la cuantificación de áreas, donde obtenemos en promedio un error del 20%, según las curvas de operación consultadas. La comparación de las diferentes aleaciones fue justificada con los resultados de las pruebas F y t, (Apéndice E). Los materiales presentan valores de volumen diferentes en cada ensayo, sin embargo, existen algunas excepciones, por lo que se optó por realizar pruebas de intervalo de confianza, con lo que aseguramos que, para esos casos, se puede decidir utilizar cualquier aleación en el proceso, por presentar similar comportamiento al desgaste.

### **5.5.4 Relaciones de desgaste vs. parámetros microestructurales.**

Las correlaciones obtenidas en esta sección, demuestran lo observado en las superficies de los materiales y los resultados obtenidos de desgaste erosivo, que además de la composición química y dureza, los parámetros de microestructura son de suma importancia en la resistencia al desgaste, el espaciamiento entre carburos y la trayectoria

media libre entre matriz y carburo, pueden permitir que exista mayor o menor magnitud en la deformación plástica en la matriz, esto es, los carburos actúan como barreras al desplazamiento de las dislocaciones, en conjunto con las fronteras de grano y, por lo tanto, a la deformación que se lleva a cabo al existir el flujo plástico del material. De esta forma, la densidad de carburos es importante en la matriz de los recubrimientos metálicos, pero la distribución de ellos es aún más importante, las correlaciones encontradas en los ensayos realizados a  $0^\circ$  y  $30^\circ$ , describen lo anterior, para ambos casos se encontró la relación de los parámetros con el desgaste erosivo evaluado, presentan una función de potencia. No existe una relación directa del desgaste con la fracción volumétrica de carburos o con la dureza, sin embargo, las gráficas nos dan una idea de los intervalos útiles de estas propiedades de los materiales para condiciones de trabajo realizadas en esta prueba.

Las relaciones de desgaste vs. los parámetros de la trayectoria media libre ( $\lambda$ ) y el espaciamiento entre carburos ( $\sigma$ ), se comportan como una función de potencia, aproximadamente de orden 2, parábola, para el ensayo de  $0^\circ$ , donde el desgaste erosivo es función de  $\lambda$  y  $\sigma$ . Así, al tener un material que posea un espaciamiento entre partículas pequeño, casi cero, implica tener una fase o capa continua de carburos, según esta función, el desgaste erosivo sería casi nulo, en el caso contrario de tener un mayor espaciamiento, el desgaste se incrementaría rápidamente, como lo observamos en las gráficas (b) y (c) de la figura 4.19. Lo anterior es debido a que los parámetros de  $\lambda$  y  $\sigma$  permitirán que el área expuesta de la matriz entre en contacto con el flujo de partículas de impacto, las cuales provocarán la deformación plástica y al final el desgaste del material.

Para el ensayo de  $30^\circ$ , el desgaste es una función de potencia de orden 2 (parábola) de los parámetros  $\lambda$  y  $\sigma$ . donde se observa similar comportamiento que en el ensayo a  $0^\circ$  (ver (b) y (c) de la figura 4.20). Aquí, la rapidez de desgaste es mayor debido a la naturaleza de contacto de las partículas con el material. Lo anterior explica la curva obtenida, donde el desgaste erosivo es mayor.

La aplicación de las correlaciones encontradas con dos recubrimientos metálicos, concuerdan estrechamente. El error encontrado es de aproximadamente 1% para el material R7, sin embargo, el error para el R6 es de un 3%. Lo anterior se atribuye a una alta porosidad del material que contribuye a incrementar el volumen de desgaste, además se puede pensar en que la correlación tenga límites de aplicación, es decir, si se trabaja con materiales con valores de  $\lambda$  y  $\sigma$  grandes, el comportamiento del desgaste erosivo cambiaría, probablemente en forma lineal.

## **5.6 ESCALAMIENTO A UNA TUBERÍA DE PLANTA INDUSTRIAL.**

Aunque el realizar un escalamiento de desgaste a una planta industrial involucra considerar los parámetros de operación y las propiedades de los materiales, se puede considerar como una primera aproximación de desgaste el escalamiento propuesto en este trabajo. Tomando en cuenta que no va existir desgaste químico en los materiales y que las condiciones de transporte neumático de pellets de fierro esponja sean similares a las estudiadas aquí. Los valores obtenidos del tiempo de desgaste para 2 mm de espesor de pared en el escalamiento realizado, son predicciones con datos obtenidos de una prueba con condiciones de desgaste acelerado, es decir, los parámetros de operación de la prueba de la máquina de desgaste son los más severos, dado el tiempo limitado para evaluar los materiales. Debido a esta razón los tiempos de desgaste son altos, considerando que un paro en la industria para dar mantenimiento se realiza aproximadamente cada 6 meses. Sin embargo, podemos utilizar estos datos para determinar que aleaciones son óptimas, considerando un balance en la resistencia al desgaste erosivo y su costo.

**Lista de Figuras:**

Figura 5.1. Diagrama de fases Fe - Cr - C.

Figura 5.2. Microestructura del acero A106B, con zona de deformación plástica y principio del mecanismo de recristalización.

**REFERENCIAS**

[1D] Alloy Phase Diagrams. ASM Handbook. Volume 3. 1990.

[2D] Martínez D. Dora. Tesis de Maestría “Desgaste de Aceros Aleados en Sistemas de Transporte Neumático”. Septiembre 1996.

[3D] Guy A. G. Elements of Physical Metallurgy. 2<sup>nd</sup>. Edit Addison Wesley. MA, USA 1959.

[4D] Lai George Y. High Temperature Corrosion of Engineering Alloys. Carburization and Metal Dusting, Cap. 4. 1989.

[5D] Grabke H. J. Metal Dusting of Low and High Alloy Steels. Corrosion Science Vol. 51, No. 9, 1995 pg. 711 - 719.

[6D] Hutchings I. M. Tribology, Friction and Wear of Engineering Materials. Edited by Edward Arnold. London U. K. 1992.

## CAPÍTULO 6

# COMENTARIOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 Comentarios.

- Los recubrimientos metálicos presentan estructuras heterogéneas complejas, con una alta densidad de carburos complejos, los cuales dan una alta dureza a las aleaciones que demuestran ser resistentes al desgaste erosivo y químico. Existen diferencias en las microestructuras de estos materiales, principalmente en el espaciamiento y trayectoria media libre entre carburos y matriz, a pesar de tener una composición química similar.
- La experimentación en planta piloto mostró que después de varios días de trabajo, el acero bajo carbono y el acero P-22 sufrieron daños considerables debido a la corrosión por picadura a alta temperatura. Es difícil de estimar la pérdida de espesor en los aceros, debido al extensivo daño por corrosión en los aceros bajo carbono y tipo P-22, además de la formación de la capa de óxido en la superficie y de una capa de hierro esponja adherida en algunas zonas.
- El acero inoxidable 304 no presentó daño por corrosión. Únicamente presentó daño mecánico tipo erosión y deformación plástica en la superficie. En el caso del acero al

bajo carbono y el acero P-22, es posible que los granos del acero deformado presenten recuperación o recristalización a la temperatura utilizada en este estudio (580°C). Se observa en la superficie algunos granos muy pequeños, que pueden ser relacionados al proceso de recristalización. Existe endurecimiento por deformación plástica al erosionar la superficie de los tres aceros utilizados en la prueba de planta piloto, está ocurre en la subsuperficie hasta una profundidad promedio de 200  $\mu\text{m}$ .

- Las pruebas de corrosión a alta temperatura mostraron que la aleación de recubrimiento duro Cr - Ni - Mo - C es más resistente que los aceros: inoxidable 304, P-22 y acero bajo carbono, en ese orden de jerarquía. El mecanismo de corrosión actuando en los aceros bajo carbono, P-22 y el acero inoxidable, es “metal dusting”, que se caracteriza por la formación de carburos metaestables.
- La máquina de erosión en caliente permitió pruebas comparativas para diferentes materiales a diferentes ángulos de impacto. A 30° el daño superficial es más alto que a 0°. En ambos casos, surcos, deformación plástica y la pérdida de material ocurren pero, a 30° estos son mayores. Esto es debido a la naturaleza de contacto entre partículas y superficie. En el ensayo a 0°, la magnitud de desgaste volumétrico del acero inoxidable, en comparación al recubrimiento R1, es casi 60 veces mayor. Los recubrimientos restantes resisten en promedio 4 veces más que el acero inoxidable, a excepciones de algunas aleaciones de fundición blanca, donde el desgaste da la misma magnitud que el acero inoxidable. La diferencia entre las pruebas de 0° a 30° es de un orden de magnitud mayor para el caso del acero inoxidable, R1, R4, R5 y R6. La relación entre el desgaste en el acero inoxidable (a 30°) y en el recubrimiento R1 conservando una razón cercana a 55 veces más desgaste.
- Los recubrimientos metálicos R3, R4 y R6 presentan un alto desgaste, casi comparable con el acero inoxidable AISI 304 en ambas pruebas. Ellos se caracterizan por una alta densidad de  $\text{Fe}_3\text{C}$  y presencia de la fase martensita en la matriz.

- Los parámetros de microestructura son de suma importancia en la resistencia al desgaste, el espaciamiento entre carburos y la trayectoria media libre entre matriz y carburo, permiten que exista mayor o menor magnitud en la deformación plástica en la matriz. No existe una relación directa entre la fracción volumétrica de carburos y dureza con el desgaste erosivo. El desgaste erosivo es función de la trayectoria media libre ( $\lambda$ ) y el espaciamiento entre carburos ( $\sigma$ ), la relación del desgaste erosivo vs. los parámetros de  $\lambda$  y  $\sigma$ , se comportan como una función de potencia, aproximadamente de orden 2, parábola, en los ensayos a  $0^\circ$  y  $30^\circ$ . El desgaste en esta última condición es prácticamente un orden de magnitud mayor.
- Los valores obtenidos del tiempo de desgaste para 2 mm de profundidad en el escalamiento realizado para el acero inoxidable y la aleación R1 son altos, Sin embargo, podemos utilizar este escalamiento para determinar que aleación es óptima, considerando un balance en la resistencia al desgaste erosivo y su costo.
- En el modelo de desgaste erosivo, se determina que la propiedad mecánica de dureza del material, no participa en forma directa con la resistencia al desgaste, se encuentra que los parámetros microestructurales son las principales variables que participan en la resistencia al desgaste.



## 6.2 Conclusiones.

Las siguientes conclusiones pueden ser obtenidas de los resultados de la investigación sobre el desgaste erosivo de aleaciones en el proceso de transporte neumático de hierro esponja en caliente.

- Se encontró una correlación cualitativa y cuantitativa entre los parámetros microestructurales, trayectoria media libre y espaciamiento entre carburos con el mecanismo de erosión. Lo anterior permitió utilizar materiales más avanzados que presentan microestructuras más adecuadas que los materiales convencionales, tales como el acero inoxidable AISI 304.
- Se desarrollo una metodología para la evaluación de los parámetros microestructurales, la cual permite evaluar en forma directa estos parámetros (trayectoria media libre y espaciamiento entre carburos) y son utilizados como herramienta predictiva para la evaluación del comportamiento tribologico del material en cuestión.
- Con la información generada en las diferentes pruebas, es posible escalar la tasa de erosión a tuberías industriales.

### 6.3 Recomendaciones.

Las siguientes recomendaciones son de gran importancia para ampliar el conocimiento del fenómeno de desgaste presente en líneas de tubería bajo condiciones de transporte industrial de HRD.

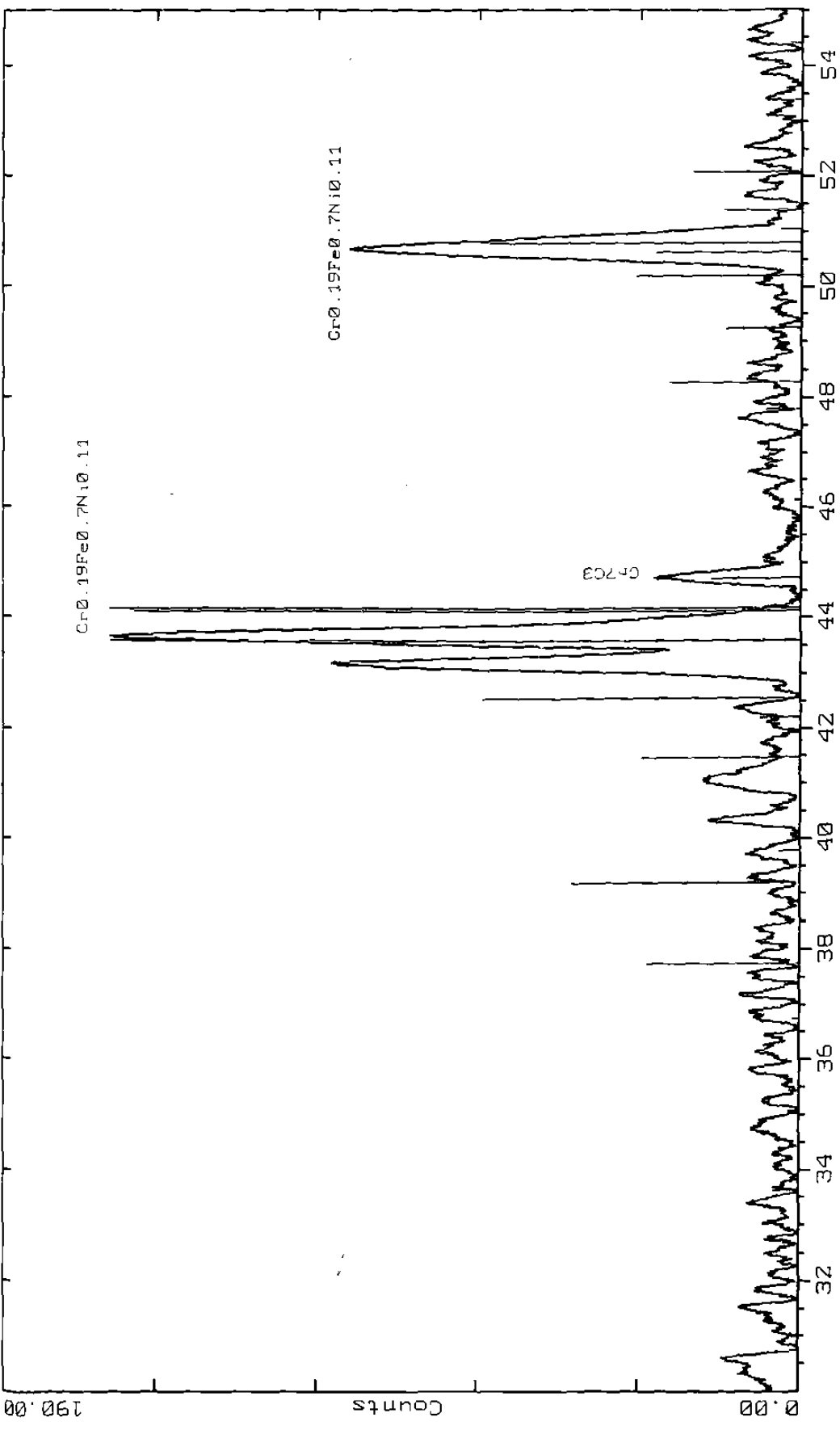
- Trabajar con una línea de tubería industrial, donde se pueda evaluar las correlaciones realizadas para diferentes materiales con opción a ser utilizados y encontrar la ecuación del modelo de desgaste erosivo, que involucre estas correlaciones y los principales parámetros del proceso de transporte neumático.
- La construcción de un mapa de desgaste del acero inoxidable, bajo condiciones de operación del proceso, sería un gran logro para la aplicación de este material en secciones de la línea de transporte neumático (líneas verticales y líneas horizontales para descarga del reactor de enfriamiento), ya que existe menor contacto con el flujo de sólidos y las temperaturas son menores, lo que afectaría al material.
- Al recomendar una aleación de recubrimiento metálico, se investigaría su evolución microestructural, estudiando el efecto de envejecimiento en el material y ver su comportamiento con el desgaste mecánico, estableciendo de esta forma, el tiempo útil del funcionamiento de un material complejo, como es un recubrimiento duro. Al igual que el acero inoxidable, se puede construir el mapa de desgaste - evolución de microestructura, para diferentes condiciones de proceso.

## **APÉNDICE**

### **A**

## **DIFRACTOGRAMAS DE LOS RECUBRIMIENTOS**

2-Theta - Scale UANL-Facultad de Ciencias Quimicas, left Goniometer 01-Oct-1999 11:30



C:\USERDATA\ACT.RAW ACT (CT: 1.0s, SS:0.010dg, WL: 1.5406Ao, DX: .000, TC : Room)  
33-0397 \* Cr0.19Fe0.7Ni0.11 Chromium Iron Nickel 304-stainless steel (WL: 1.5406Ao)  
35-0783 \* Cr23C6 Chromium Carbide (WL: 1.5406Ao)  
36-1482 \* Cr7C3 Chromium Carbide heptachromium tricarbide (WL: 1.5406Ao)

Figura 4.1. Difractograma del recubrimiento R1.

2-theta - Scale UANL-Facultad de Ciencias Quimicas, left Goniometer 01-Oct-1999 10:19

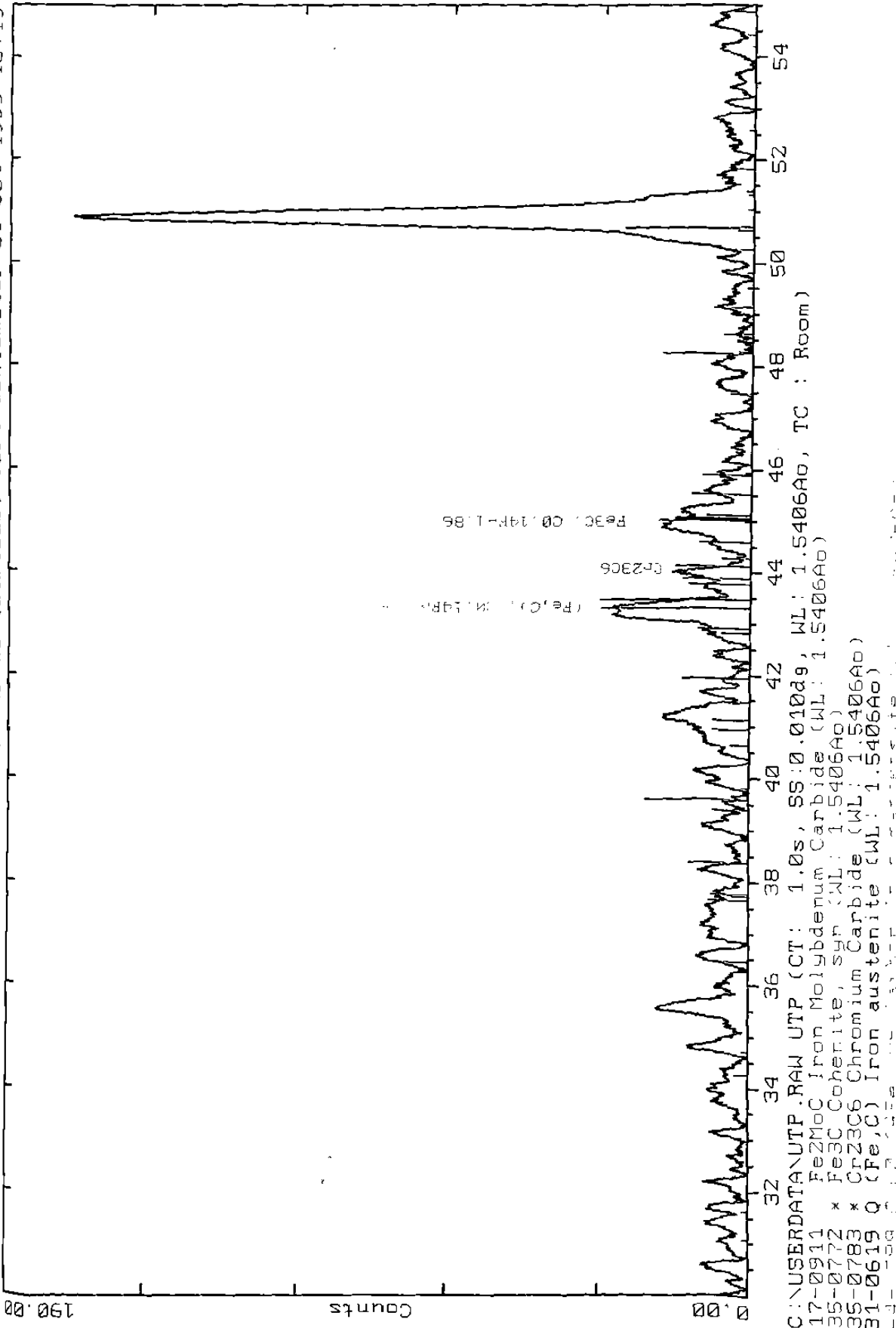


Figura 4.2. (a) Difractograma del recubrimiento R2.

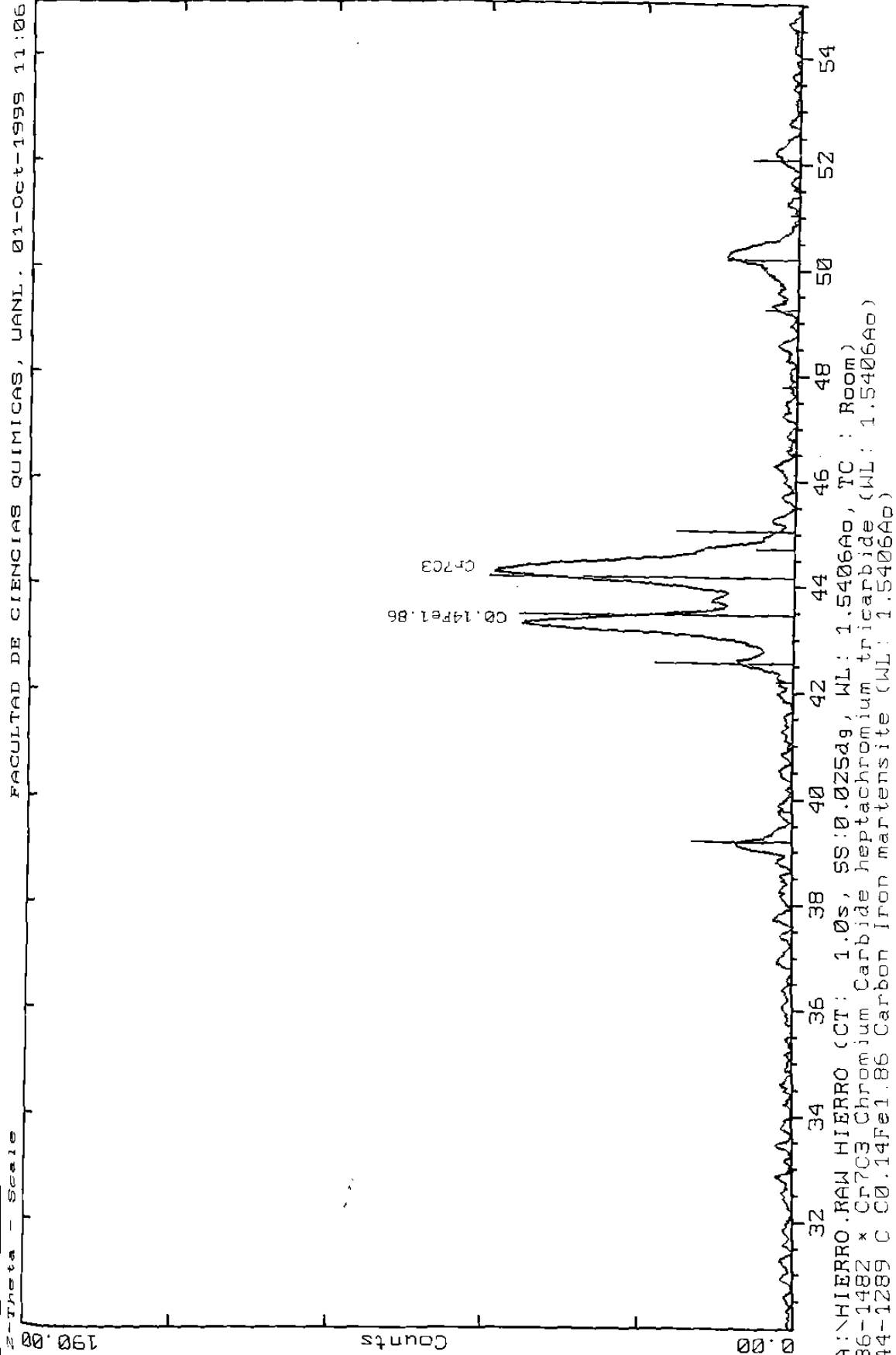


Figura 4.2. (b) Difractograma del recubrimiento R3.

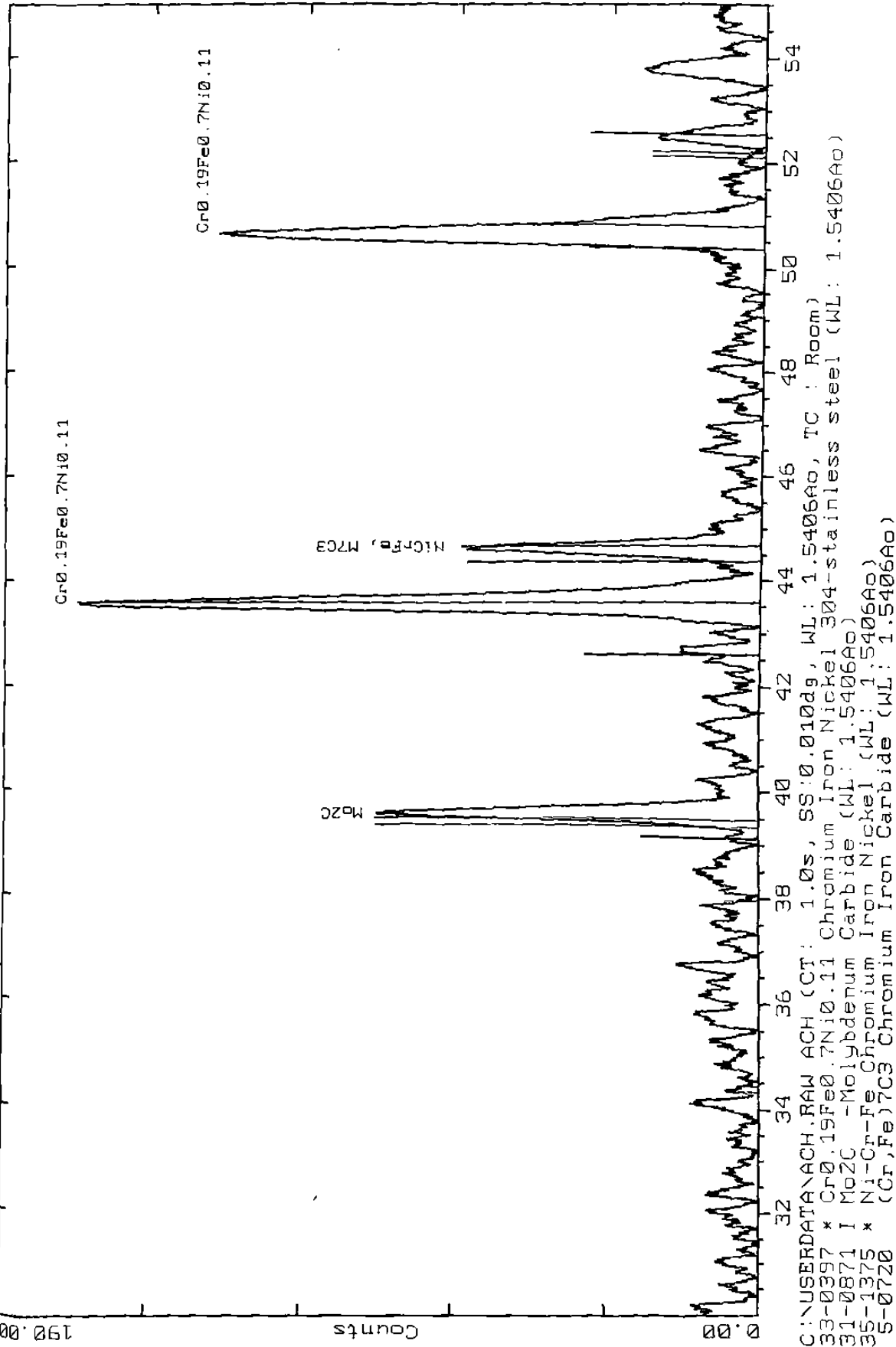
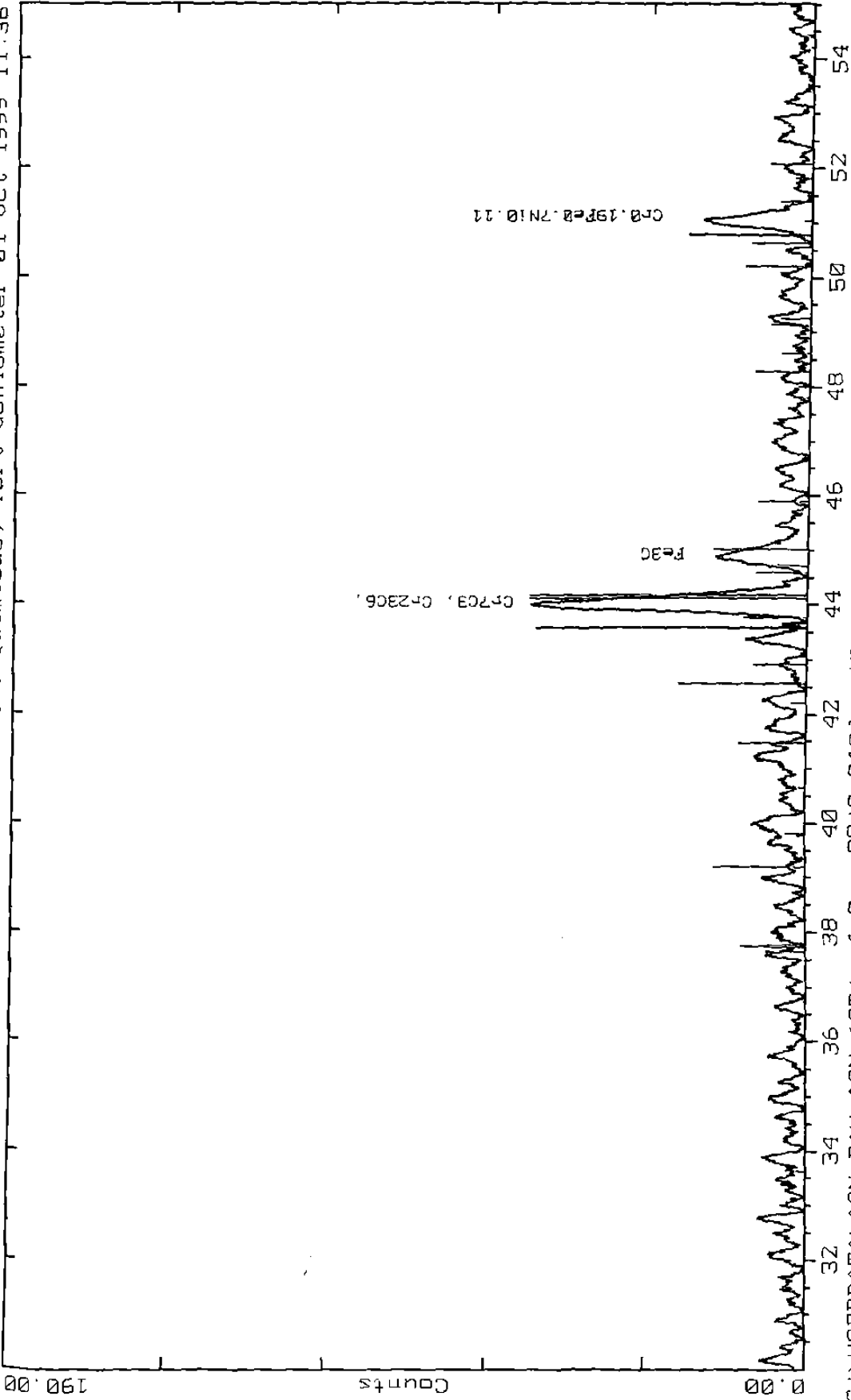


Figura 4.3. (a) Difractograma del recubrimiento R4.

Z-Theta - Scale UANL-Facultad de Ciencias Quimicas, left Goniometer 01-Oct-1999 11:36



C:\USERDATA\ACN.RAW ACN (CT: 1.0s, SS:0.010dg, WL: 1.5406Ao, TC: Room)  
36-1482 \* Cr7C3 Chromium Carbide heptachromium tricarbide (WL: 1.5406Ao)  
35-2772 \* Fe3O4 Magnetite, syn (WL: 1.5406Ao)  
35-0783 \* Cr23C6 Chromium Carbide (WL: 1.5406Ao)  
33-0397 \* Cr0.19Fe0.7Ni0.11 Chromium Iron Nickel 304-stainless steel (WL: 1.5406Ao)

Figura 4.3. (b) Difractograma del recubrimiento R5.



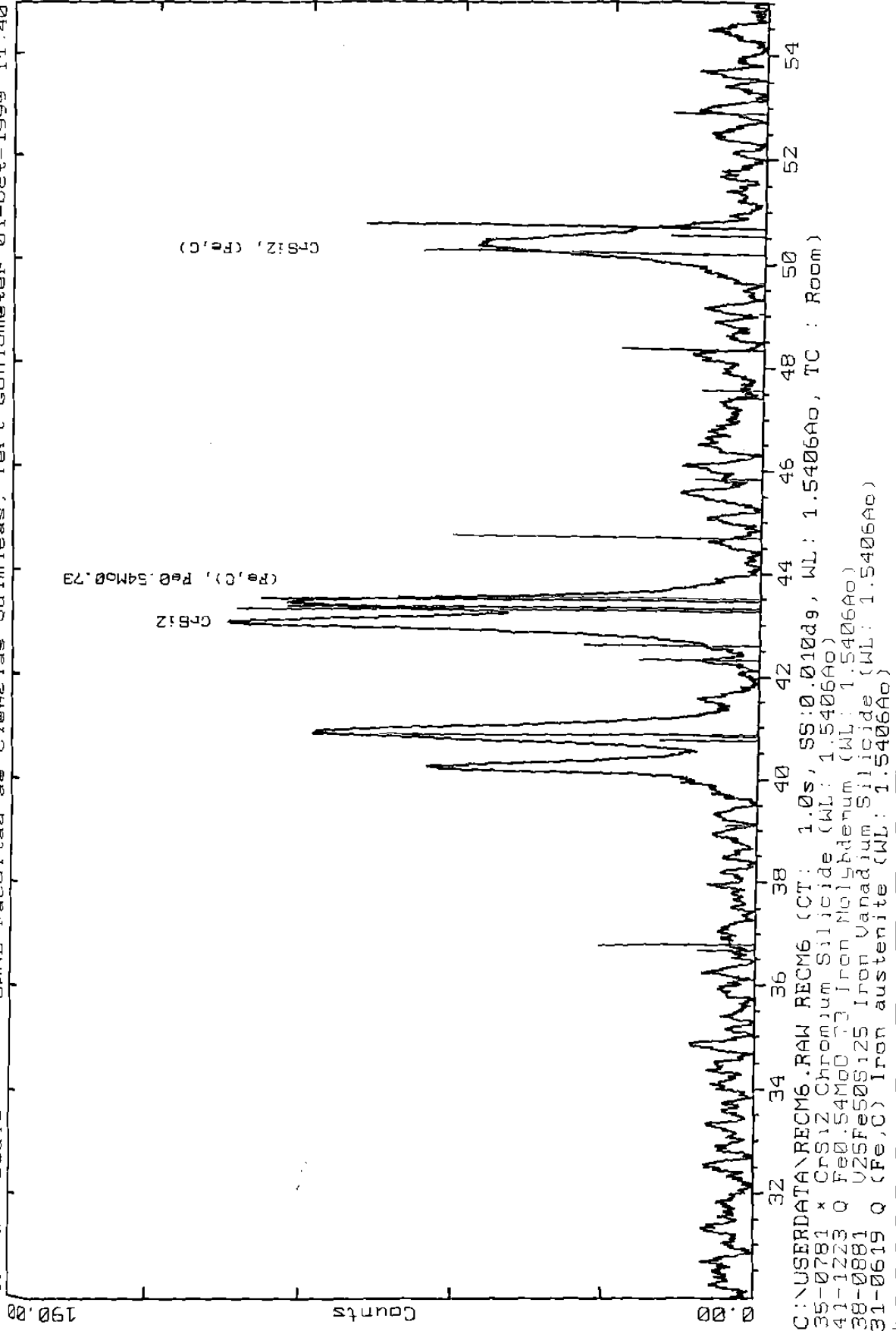


Figura 4.4. Difractograma del recubrimiento R6.

2-Theta - Scale UANL-Facultad de Ciencias Quimicas, left Goniometer 01-Oct-1999 11:44

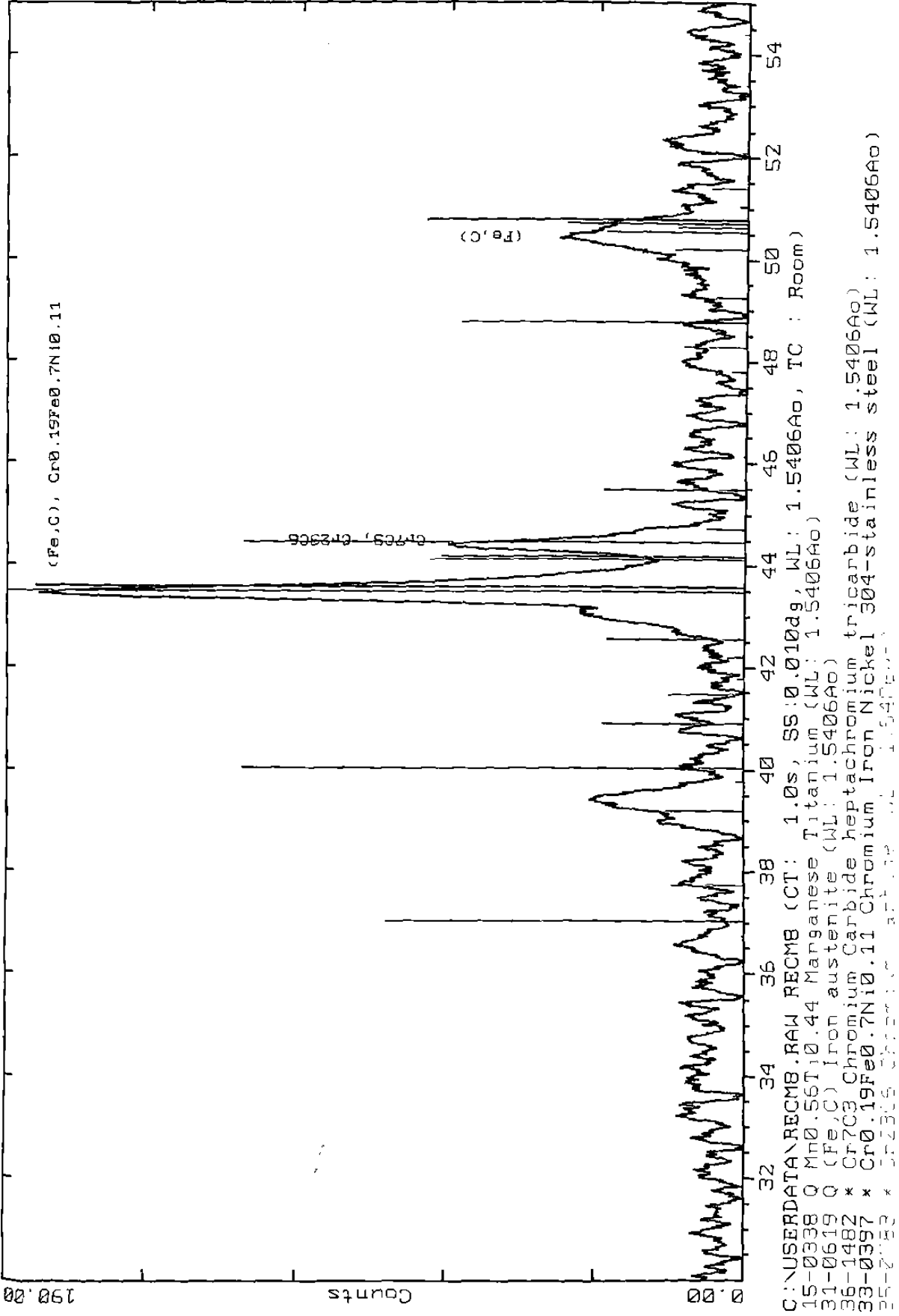


Figura 4.5. Difractograma del recubrimiento R7.

## **APÉNDICE**

### **B**

## **DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE MICROESTRUCTURA**

Los parámetros de microestructura: espaciamiento entre carburos y trayectoria media libre entre carburos y matriz, se determinaron indirectamente por medio de las siguientes relaciones [2E]:

$$\lambda = (1 - V_v) / N_L$$

$$\sigma = 1 / N_L$$

donde:  $\lambda$  = es la trayectoria media libre entre carburos y matriz

$\sigma$  = es el espacio entre carburos

$V_v = A_A = L_L$  = fracción volumétrica de carburos

$N_L = N_i / L$ ,

L = longitud estándar (100  $\mu$ m)

$N_i$  = número de intercepciones por la longitud estándar

donde los datos de  $V_v$  promedio, para todos los recubrimientos metálicos fueron los siguientes:

	R1		
	AREA	%AREA	NUM.
1	83341	0.384	647
2	47860	0.22	673
3	8088.9	0.373	237
4	47521	0.219	125
5	61045	0.281	228
6	63234	0.291	155
7	108000	0.501	135
8	54367	0.25	279
9	75420	0.347	172
10	67318	0.31	133
11	46192	0.213	115
12	57755	0.266	158
13	59988	0.276	127
14	60857	0.28	102
15	51077	0.235	103
PROM	59471	0.2964	225.93
DESEST	21469	0.0778	183.68
VAR	5E+08	0.0061	33737

	R2		
	AREA	%AREA	NUM.
1	60698	0.28	560
2	86385	0.4	698
3	64399	0.3	497
4	49324	0.23	459
5	67592	0.31	459
6	82500	0.38	465
7	60916	0.28	409
8	56907	0.26	522
9	40635	0.19	290
10	22848	0.11	228
11	44317	0.2	401
12	31356	0.14	267
13	57740	0.27	428
14	62504	0.29	270
15	99868	0.46	737
PROM	59199	0.273	446
DESEST	2038.4	0.094	148.53
VAR	4E+06	0.005	22061

R3				R4			
	AREA	%AREA	NUM.		AREA	%AREA	NUM.
1	79540	0.366	349	1	65072	0.3	365
2	102000	0.469	400	2	57061	0.263	353
3	96525	0.445	275	3	54531	0.251	315
4	77855	0.359	613	4	50836	0.234	294
5	91304	0.421	456	5	46874	0.216	319
6	99516	0.458	384	6	52393	0.241	277
7	102000	0.469	440	7	62939	0.29	362
8	90311	0.416	381	8	59628	0.275	364
9	96503	0.445	368	9	62874	0.29	330
10	104000	0.477	375	10	61080	0.281	364
11	95106	0.438	445	11	62971	0.29	433
12	99419	0.458	404	12	59347	0.273	450
13	88381	0.407	618	13	68181	0.314	400
14	104000	0.478	232	14	63019	0.29	515
15	90682	0.418	396	15	60043	0.277	372
PROM	94476	0.4349	409.07	PROM	59123	0.2723	367.53
DESEST	8156.8	0.0372	102.53	DESEST	5796.4	0.0268	62.283
VAR	7E+07	0.0014	10512	VAR	3E+07	0.0007	3879.1

R5							
	AREA	%AREA	NUM.		AREA	%AREA	NUM.
1	59116	0.272	307	10	63724	0.294	301
2	54155	0.25	405	11	49592	0.229	303
3	61517	0.283	309	12	53523	0.247	320
4	73228	0.337	275	13	67470	0.311	266
5	64317	0.296	300	14	59502	0.274	321
6	56635	0.261	331	15	64986	0.299	134
7	53299	0.246	366	16	61459	0.283	263
8	46936	0.216	406	17	50801	0.234	355
9	46434	0.214	299				
PROM	58296	0.2686	309.53				
DESEST	7761.1	0.0356	63.546				
VAR	6E+07	0.0013	4038.1				

R6			
	AREA	%AREA	NUM.
1	30188	0.373	240
2	32015	0.361	207
3	31622	0.363	217
PROM	31275	0.36	221
DESEST	785.19	0.05	13.82
VAR	6E+07	0.0003	190.9

R7			
	AREA	%AREA	NUM.
1	50889	0.4	278
2	47337	0.414	240
3	45693	0.364	287
PROM	47973	0.396	268
DESEST	2169	0.026	20.37
VAR	6E+07	0.004	414

La variable  $N_L$  ( $N_L = N_i/L$ ) se obtuvo, con una longitud estándar = 100 micras, de los siguientes datos:

R6	
número	intersecciones
1	3
2	1
3	2
4	3
5	5
6	3
7	1
8	2
<b>prom.</b>	2.19
<b>desv.</b>	1.29

R7	
número	intersecciones
1	4
2	3
3	4
4	2
5	3
6	2
7	3
8	3
<b>prom.</b>	3
<b>desv.</b>	0.9

Aleaciones	fracción de área ( $A_A$ ) %Area	número de carburos	área total de carburos
R1	30%	226	59471
R2	30%	446	59199
R3	43%	410	94476
R4	27%	368	59123
R5	27%	310	58296

La gráfica figura 1B, describe la fracción volumétrica de carburos en los diferentes recubrimientos metálicos.

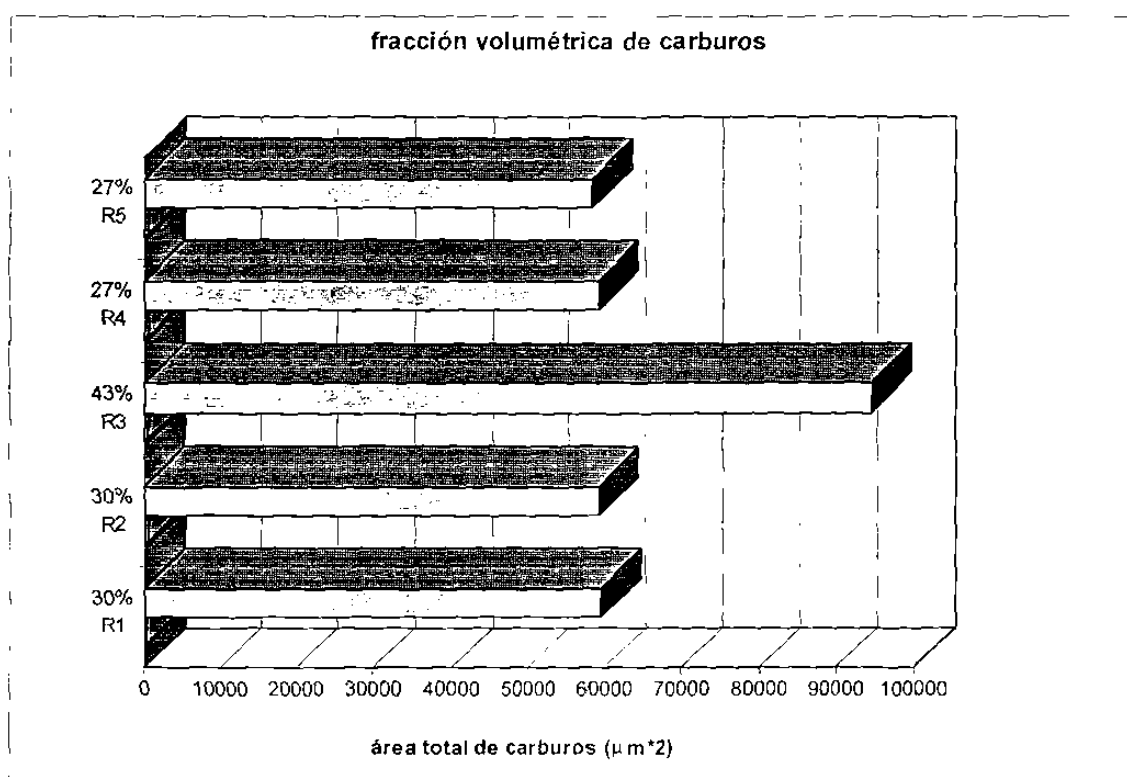


Figura 1B. Fracción volumétrica de carburos de diferentes recubrimientos metálicos.

En la figura 1B se observan los porcentajes de área promedio que ocupan los carburos en una área de  $2.171 \times 10^{-5} \mu\text{m}^2$ , un campo de imagen a una magnificación de 100x.

La variable  $N_L$  ( $N_L = N/L$ ) se obtuvo, con una longitud estándar = 100 micras, de los siguientes datos:

R1	
número	intersecciones
1	9
2	10
3	9
4	9
5	6
6	4
7	11
8	13
9	8
10	9
11	8
12	4
13	5
14	7
15	10
<b>prom.</b>	<b>8.133</b>
<b>desv.</b>	<b>2.56</b>

R2	
número	intersecciones
1	4
2	5
3	3
4	4
5	4
6	9
7	2
8	7
9	2
10	6
11	3
12	2
13	4
14	9
15	4
<b>prom.</b>	<b>4.6</b>
<b>desv.</b>	<b>2.04</b>



R3	
número	intersecciones
1	4
2	3
3	2
4	3
5	2
6	3
7	1
8	2
9	2
10	3
11	1
12	1
13	2
14	2
15	1
<b>prom.</b>	2.11
<b>desv.</b>	0.85

R4	
número	intersecciones
1	3
2	2
3	3
4	1
5	2
6	3
7	2
8	3
9	2
10	4
11	3
12	4
13	1
14	2
15	2
<b>prom.</b>	2
<b>desv.</b>	0.5

R5	
número	intersecciones
1	3
2	6
3	3
4	2
5	4
6	5
7	5
8	3
9	3
10	4
11	3
12	4
13	5
14	4
15	3
<b>prom.</b>	4
<b>desv.</b>	0.5

R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
$N_L = 8/100$	$N_L = 5/100$	$N_L = 2/100$	$N_L = 2/100$	$N_L = 4/100$	$N_L = 2/100$	$N_L = 2/100$
$N_L = 0.08$	$N_L = 0.05$	$N_L = 0.02$	$N_L = 0.02$	$N_L = 0.04$	$N_L = 0.02$	$N_L = 0.02$
$\lambda (\mu\text{m}) =$ 1 - 0.3/0.08	$\lambda (\mu\text{m}) =$ 1 - 0.3/0.05	$\lambda (\mu\text{m}) =$ 1 - 0.43/0.02	$\lambda (\mu\text{m}) =$ 1 - 0.27/0.02	$\lambda (\mu\text{m}) =$ 1 - 0.27/0.04	$\lambda (\mu\text{m}) =$ 1 - 0.32/0.02	$\lambda (\mu\text{m}) =$ 1 - 0.39/0.02
$\lambda = 8.75$	$\lambda = 14$	$\lambda = 28.5$	$\lambda = 36.5$	$\lambda = 18.25$	$\lambda = 32$	$\lambda = 20$
$\sigma = 12.5$	$\sigma = 20$	$\sigma = 50$	$\sigma = 50$	$\sigma = 25$	$\sigma = 50$	$\sigma = 33$

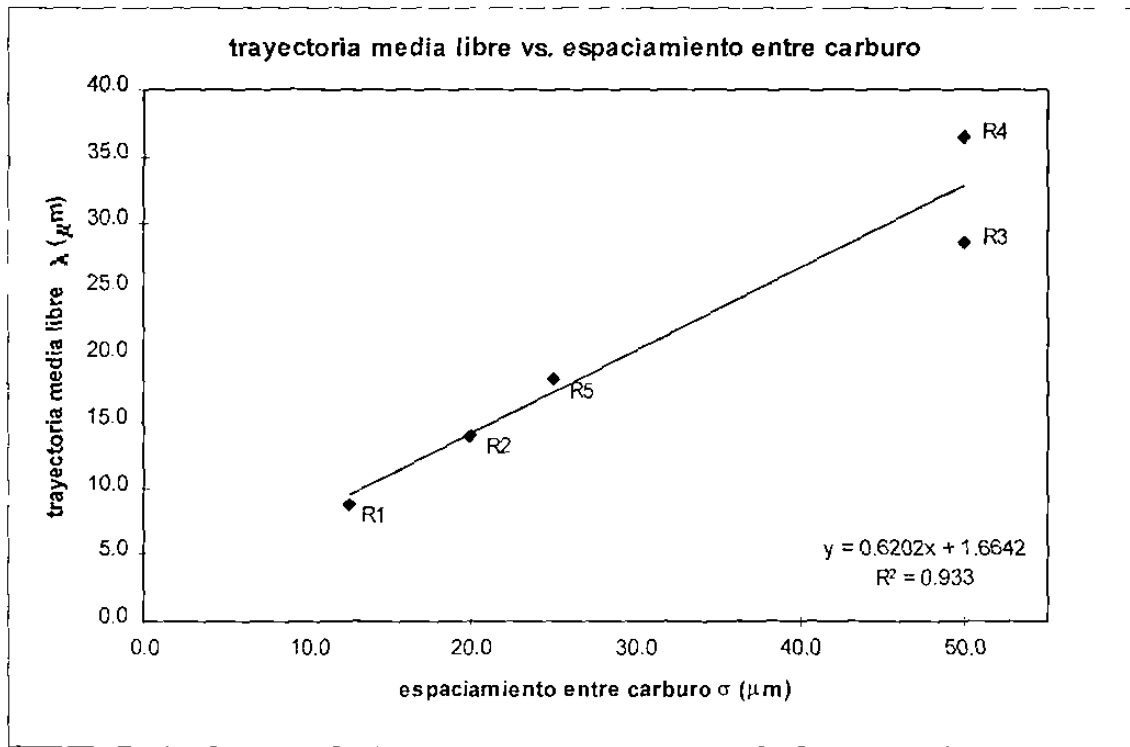


Figura 2B. Relación entre la trayectoria media libre vs. espaciamento entre carburo.

# APÉNDICE

## C

### LECTURA DE ESPESORES

**Acero al carbono**

lecturas iniciales realizadas el 18 marzo de 1996 en 10 posiciones diferentes

cada 5 cm. Espesor en en milésimas de pulgadas.

En coordenadas cardinales

Velocidad del ultra sonido 6164 cm/seg.

**Lado inferior (sur)**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.239	0.239	0.239	0.239	0.239	0.239	0.239	0.239	0.239	0.243
2	0.239	0.239	0.243	0.243	0.243	0.239	0.239	0.243	0.243	0.243
3	0.243	0.239	0.239	0.239	0.243	0.243	0.239	0.243	0.239	0.239
4	0.239	0.239	0.239	0.239	0.243	0.239	0.243	0.239	0.239	0.239
5	0.239	0.239	0.239	0.243	0.239	0.243	0.239	0.239	0.239	0.243
6	0.239	0.239	0.239	0.239	0.243	0.239	0.239	0.239	0.239	0.239
Pro.	0.23967	0.239	0.23967	0.24033	0.24167	0.24033	0.23967	0.24033	0.23967	0.241
Desv.	0.00163	4.7E-09	0.00163	0.00207	0.00207	0.00207	0.00163	0.00207	0.00163	0.00219
Var.	2.7E-06	2.2E-17	2.7E-06	4.3E-06	4.3E-06	4.3E-06	2.7E-06	4.3E-06	2.7E-06	4.8E-06

**Lado Este**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.239	0.243	0.243	0.247	0.243	0.243	0.243	0.243	0.243	0.243
2	0.243	0.243	0.247	0.247	0.247	0.243	0.247	0.243	0.243	0.243
3	0.243	0.243	0.243	0.243	0.243	0.243	0.243	0.247	0.247	0.247
4	0.243	0.247	0.247	0.247	0.247	0.247	0.247	0.243	0.247	0.247
5	0.243	0.247	0.243	0.247	0.247	0.251	0.247	0.251	0.243	0.243
6	0.243	0.247	0.247	0.247	0.247	0.247	0.247	0.247	0.247	0.247
Pro.	0.24233	0.245	0.245	0.24633	0.24567	0.24567	0.24567	0.24567	0.245	0.245
Desv.	0.00163	0.00219	0.00219	0.00163	0.00207	0.00327	0.00207	0.00327	0.00219	0.00219
Var.	2.7E-06	4.8E-06	4.8E-06	2.7E-06	4.3E-06	1.1E-05	4.3E-06	1.1E-05	4.8E-06	4.8E-06

**Lado Superior (Norte)**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.243	0.247	0.243	0.243	0.243	0.243	0.243	0.243	0.243	0.243
2	0.243	0.243	0.243	0.239	0.243	0.243	0.243	0.243	0.243	0.247
3	0.243	0.243	0.243	0.239	0.243	0.239	0.243	0.243	0.243	0.243
4	0.243	0.243	0.243	0.243	0.243	0.243	0.243	0.243	0.243	0.243
5	0.243	0.243	0.243	0.243	0.243	0.243	0.239	0.243	0.243	0.243
6	0.243	0.243	0.243	0.243	0.239	0.243	0.239	0.239	0.243	0.239
Pro.	0.243	0.24367	0.243	0.24167	0.24233	0.24233	0.24167	0.24233	0.243	0.243
Desv.	4.7E-09	0.00163	4.7E-09	0.00207	0.00163	0.00163	0.00207	0.00163	4.7E-09	0.00253
Var.	2.2E-17	2.7E-06	2.2E-17	4.3E-06	2.7E-06	2.7E-06	4.3E-06	2.7E-06	2.2E-17	6.4E-06

**Lado Oeste**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.255	0.251	0.251	0.251	0.251	0.255	0.251	0.251	0.247	0.251
2	0.251	0.251	0.251	0.251	0.251	0.251	0.251	0.251	0.251	0.255
3	0.251	0.251	0.251	0.251	0.255	0.251	0.251	0.251	0.251	0.251
4	0.251	0.255	0.255	0.251	0.251	0.255	0.251	0.251	0.251	0.251
5	0.255	0.251	0.255	0.251	0.255	0.255	0.251	0.251	0.251	0.251
6	0.255	0.255	0.251	0.251	0.251	0.251	0.255	0.251	0.251	0.251
Pro.	0.253	0.25233	0.25233	0.251	0.25233	0.253	0.25167	0.251	0.25033	0.25167
Desv.	0.00219	0.00207	0.00207	3.3E-09	0.00207	0.00219	0.00163	3.3E-09	0.00163	0.00163
Var.	4.8E-06	4.3E-06	4.3E-06	1.1E-17	4.3E-06	4.8E-06	2.7E-06	1.1E-17	2.7E-06	2.7E-06

**Acero al carbono**

lecturas finales realizadas el 23 de Diciembre de 1996 en 10 posiciones diferentes

cada 5 cm. Espesor en en milésimas de pulgadas.

En coordenadas cardinales

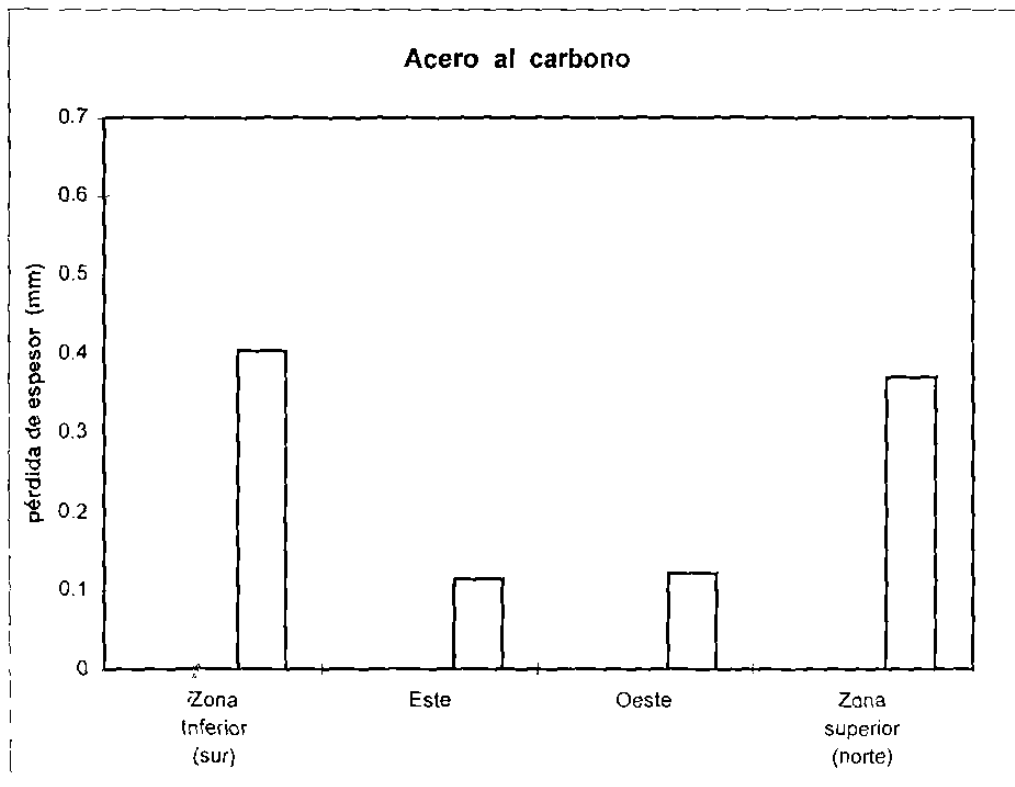
	Sur	Este	Oeste	Norte
1	0.239	0.251	0.226	0.239
2	0.239	0.247	0.23	0.247
3	0.243	0.247	0.234	0.251
4	0.243	0.23	0.234	0.251
5	0.239	0.247	0.23	0.247
<b>Pro.</b>	0.2406	0.2444	0.2308	0.247
<b>Des. Est.</b>	0.002191	0.008234	0.003347	0.004899
<b>Var.</b>	4.8E-06	6.78E-05	1.12E-05	2.4E-05

<b>Inicial</b>	Sur	Este	Oeste	Norte
1	0.2397	0.2423	0.253	0.243
2	0.239	0.245	0.25233	0.24367
3	0.2397	0.245	0.25233	0.243
4	0.2403	0.2463	0.251	0.24167
5	0.2417	0.2457	0.25233	0.24233
6	0.2403	0.2457	0.253	0.24233
7	0.2397	0.2457	0.25167	0.24167
8	0.2403	0.2457	0.251	0.24233
9	0.2397	0.245	0.25033	0.243
10	0.241	0.245	0.25167	0.243
<b>Pro.</b>	0.24014	0.24514	0.251866	0.2426
<b>Des. Est.</b>	0.000769	0.001093	0.000892	0.000644
<b>Var.</b>	5.92E-07	1.19E-06	7.95E-07	4.15E-07

Acero al Carbono. Pérdida de Espesor en pulgadas.

Zona Inferior (sur)	Inicial 240.14	-	Final 224.2	=	0.0159
Este	245.14		240.6	=	0.00454
Oeste	251.8		247	=	0.0048
Zona superior (norte)	242.6		228	=	0.0146

ACERO AL CARBONO	in	mm
Zona Inferior (sur)	0.0159	<b>0.4039</b>
Este	0.0045	<b>0.1143</b>
Oeste	0.0048	<b>0.1219</b>
Zona superior (norte)	0.0146	<b>0.3708</b>



**Acero Inoxidable AISI 304**

lecturas iniciales realizadas el 18 marzo de 1996 en 10 posiciones diferentes

cada 5 cm. Espesoren en milésimas de pulgadas.

En coordenadas cardinales

Velocidad del ultra sonido 5953 cm/seg.

**Lado inferior (sur)**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.234	0.23	0.23	0.23	0.23	0.234	0.23	0.23	0.23	0.234
2	0.234	0.234	0.234	0.23	0.23	0.234	0.23	0.23	0.23	0.23
3	0.23	0.234	0.234	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
4	0.23	0.23	0.23	0.234	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.234
5	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
6	0.23	0.23	0.23	0.234	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
Pro.	0.23133	0.23133	0.23133	0.23133	0.23	0.23133	0.23	0.23	0.23	0.23133
Desv.	0.00207	0.00207	0.00207	0.00207	0	0.00207	0	0	0	0.00207
Var.	4.3E-06	4.3E-06	4.3E-06	4.3E-06	0	4.3E-06	0	0	0	4.3E-06

**Lado Este**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.242	0.242	0.246	0.242	0.242	0.242	0.242	0.242	0.242	0.242
2	0.242	0.242	0.242	0.242	0.242	0.242	0.246	0.242	0.242	0.242
3	0.242	0.242	0.246	0.242	0.246	0.242	0.242	0.242	0.242	0.242
4	0.242	0.246	0.242	0.242	0.242	0.242	0.242	0.242	0.242	0.242
5	0.242	0.242	0.242	0.242	0.242	0.242	0.242	0.242	0.242	0.242
6	0.242	0.242	0.242	0.242	0.242	0.242	0.242	0.242	0.242	0.242
Pro.	0.242	0.24267	0.24333	0.242	0.24267	0.242	0.24267	0.242	0.242	0.242
Desv.	0	0.00163	0.00207	0	0.00163	0	0.00163	0	0	0
Var.	0	2.7E-06	4.3E-06	0	2.7E-06	0	2.7E-06	0	0	0

**Lado Superior (Norte)**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.254	0.254	0.254	0.254	0.254	0.254	0.254	0.254	0.254	0.254
2	0.258	0.254	0.254	0.254	0.258	0.254	0.258	0.258	0.258	0.258
3	0.258	0.258	0.258	0.258	0.258	0.258	0.258	0.254	0.258	0.258
4	0.254	0.254	0.254	0.254	0.246	0.254	0.254	0.254	0.254	0.246
5	0.254	0.254	0.254	0.254	0.246	0.254	0.246	0.246	0.254	0.254
6	0.258	0.258	0.258	0.254	0.258	0.254	0.258	0.258	0.254	0.254
Pro.	0.256	0.25533	0.25533	0.25467	0.25333	0.25467	0.25467	0.254	0.25533	0.254
Desv.	0.00219	0.00207	0.00207	0.00163	0.00589	0.00163	0.00468	0.00438	0.00207	0.00438
Var.	4.8E-06	4.3E-06	4.3E-06	2.7E-06	3.5E-05	2.7E-06	2.2E-05	1.9E-05	4.3E-06	1.9E-05

**Lado Oeste**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.246	0.246	0.246	0.246	0.246	0.246	0.246	0.246	0.246	0.246
2	0.246	0.246	0.254	0.246	0.246	0.246	0.246	0.254	0.246	0.246
3	0.254	0.246	0.246	0.246	0.246	0.246	0.246	0.246	0.246	0.246
4	0.246	0.246	0.246	0.246	0.246	0.246	0.246	0.246	0.254	0.254
5	0.246	0.246	0.246	0.246	0.246	0.246	0.246	0.246	0.246	0.246
6	0.246	0.246	0.246	0.246	0.246	0.246	0.254	0.246	0.246	0.246
Pro.	0.24733	0.246	0.24733	0.246	0.246	0.246	0.24733	0.24733	0.24733	0.24733
Desv.	0.00327	0	0.00327	0	0	0	0.00327	0.00327	0.00327	0.00327
Var.	1.1E-05	0	1.1E-05	0	0	0	1.1E-05	1.1E-05	1.1E-05	1.1E-05

**Acero Inoxidable AISI 304**

lecturas finales realizadas el 23 de Diciembre de 1996 en 10 posiciones diferentes

cada 5 cm. Espesoren en milésimas de pulgadas.

En coordenadas cardinales

	Sur	Este	Oeste	Norte
1	0.226	0.23	0.234	0.254
2	0.222	0.23	0.234	0.254
3	0.226	0.234	0.238	0.254
4	0.226	0.234	0.238	0.254
5	0.226	0.23	0.234	0.246
<b>Pro.</b>	0.2252	0.2316	0.2356	0.2524
<b>Des. Est.</b>	0.001789	0.002191	0.002191	0.003578
<b>Var.</b>	3.2E-06	4.8E-06	4.8E-06	1.28E-05

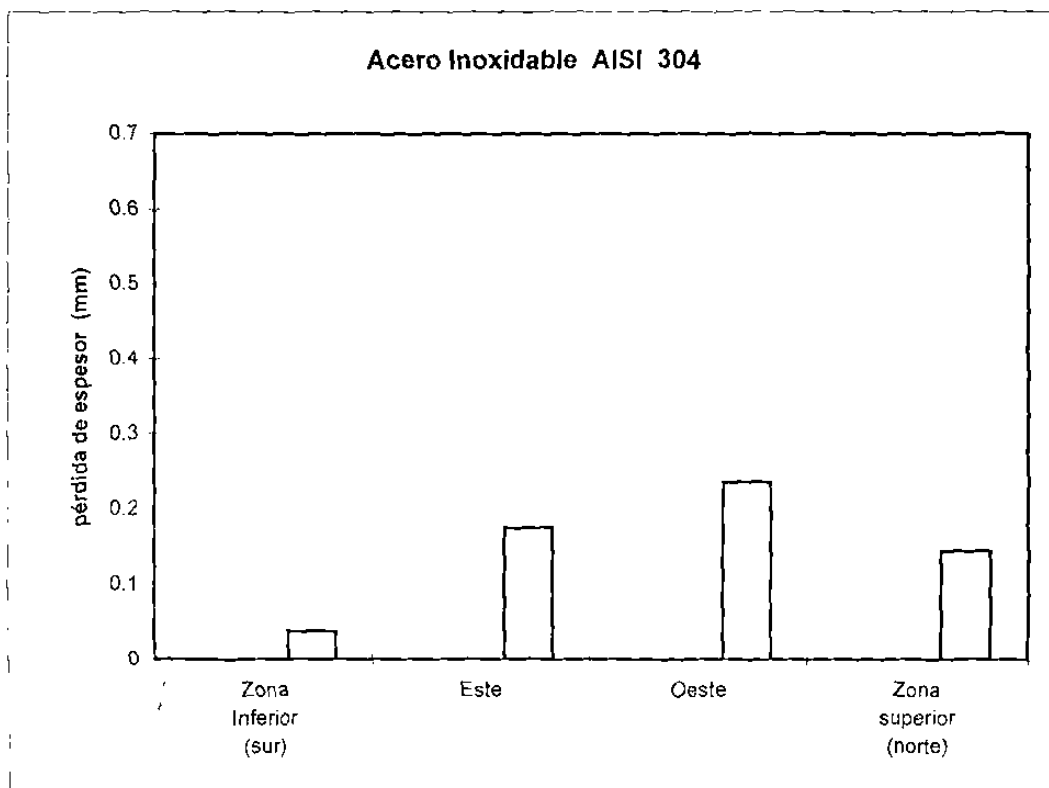
Inicial	Sur	Este	Oeste	Norte
1	0.23133	0.242	0.24733	0.256
2	0.23133	0.24267	0.246	0.25533
3	0.23133	0.24333	0.24733	0.25533
4	0.23133	0.242	0.246	0.25467
5	0.23	0.24267	0.246	0.25333
6	0.23133	0.242	0.246	0.25467
7	0.23	0.24267	0.24733	0.25467
8	0.23	0.242	0.24733	0.254
9	0.23	0.242	0.24733	0.25533
10	0.23133	0.242	0.24733	0.254
<b>Pro.</b>	0.230798	0.242334	0.246798	0.254733
<b>Des. Est.</b>	0.000687	0.000471	0.000687	0.000798
<b>Var.</b>	4.72E-07	2.22E-07	4.72E-07	6.37E-07



Acero Inoxidable AISI 304. Pérdida de Espesor en pulgadas.

	Inicial	-	Final	=	
Zona Inferior (sur)	230.7		229	=	0.0015
Este	242.3		235	=	0.0069
Oeste	246.7		237	=	0.0093
Zona superior (norte)	254.7		249	=	0.0057

AISI 304	in	mm
Zona Inferior (sur)	0.002	<b>0.0381</b>
Este	0.007	<b>0.17526</b>
Oeste	0.009	<b>0.23622</b>
Zona superior (norte)	0.006	<b>0.14478</b>



**Acero A335 tipo P22**

lecturas iniciales realizadas el 18 marzo de 1996 en 10 posiciones diferentes

cada 5 cm. Espesoren en milésimas de pulgadas.

En coordenadas cardinales

Velocidad del ultra sonido 6042 cm/seg.

**Lado inferior (sur)**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.266	0.266	0.266	0.27	0.266	0.266	0.266	0.266	0.27	0.266
2	0.27	0.266	0.266	0.266	0.266	0.27	0.266	0.27	0.266	0.266
3	0.266	0.27	0.266	0.266	0.266	0.266	0.27	0.266	0.266	0.266
4										
5										
6										
Pro.	0.26733	0.26733	0.266	0.26733	0.266	0.26733	0.26733	0.26733	0.26733	0.266
Desv.	0.00231	0.00231	3.7E-09	0.00231	3.7E-09	0.00231	0.00231	0.00231	0.00231	3.7E-09
Var.	5.3E-06	5.3E-06	1.4E-17	5.3E-06	1.4E-17	5.3E-06	5.3E-06	5.3E-06	5.3E-06	1.4E-17

**Lado Este**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.262	0.262	0.262	0.262	0.258	0.262	0.262	0.262	0.262	0.262
2	0.258	0.262	0.262	0.258	0.262	0.262	0.258	0.262	0.262	0.262
3	0.262	0.262	0.262	0.262	0.258	0.262	0.258	0.262	0.262	0.258
4										
5										
6										
Pro.	0.26067	0.262	0.262	0.26067	0.25933	0.262	0.25933	0.262	0.262	0.26067
Desv.	0.00231	3.7E-09	3.7E-09	0.00231	0.00231	3.7E-09	0.00231	3.7E-09	3.7E-09	0.00231
Var.	5.3E-06	1.4E-17	1.4E-17	5.3E-06	5.3E-06	1.4E-17	5.3E-06	1.4E-17	1.4E-17	5.3E-06

**Lado Superior (Norte)**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.274	0.27	0.27	0.27	0.274
2	0.27	0.274	0.274	0.27	0.274	0.27	0.27	0.274	0.274	0.27
3	0.274	0.274	0.274	0.274	0.274	0.274	0.274	0.274	0.27	0.274
4										
5										
6										
Pro.	0.27133	0.27267	0.27267	0.27133	0.27267	0.27267	0.27133	0.27267	0.27133	0.27267
Desv.	0.00231	0.00231	0.00231	0.00231	0.00231	0.00231	0.00231	0.00231	0.00231	0.00231
Var.	5.3E-06	5.3E-06	5.3E-06	5.3E-06	5.3E-06	5.3E-06	5.3E-06	5.3E-06	5.3E-06	5.3E-06

**Lado Oeste**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.278	0.278	0.278	0.278	0.278	0.278	0.278	0.278	0.278	0.282
2	0.278	0.278	0.278	0.278	0.278	0.282	0.278	0.278	0.278	0.278
3										
4										
5										
6										
Pro.	0.278	0.278	0.278	0.278	0.278	0.28	0.278	0.278	0.278	0.28
Desv.	0	0	0	0	0	0.00283	0	0	0	0.00283
Var.	0	0	0	0	0	8E-06	0	0	0	8E-06

**Acero A335 tipo P22**

lecturas finales realizadas el 23 de Diciembre de 1996 en 10 posiciones diferentes

cada 5 cm. Espesor en milésimas de pulgadas.

En coordenadas cardinales

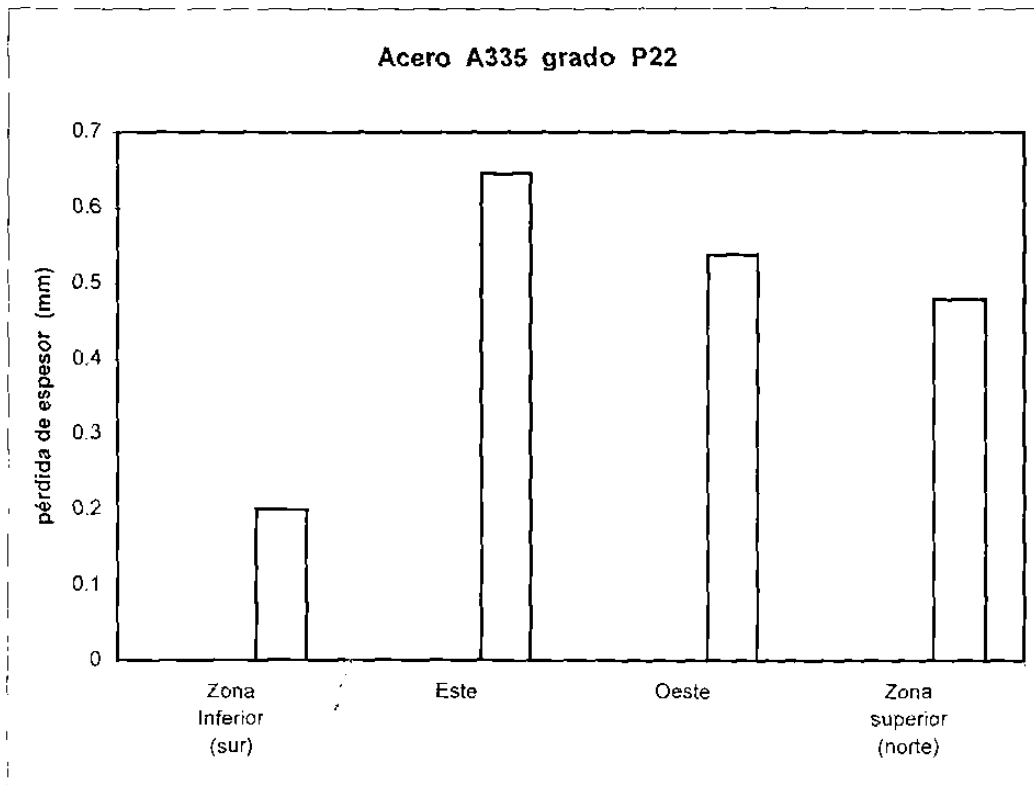
	Sur	Este	Oeste	Norte
1	0.258	0.234	0.258	0.25
2	0.258	0.238	0.258	0.25
3	0.262	0.234	0.25	0.258
4	0.262	0.238	0.262	0.25
5	0.258	0.234	0.258	0.258
<b>Pro.</b>	0.2596	0.2356	0.2572	0.2532
<b>Des. Est.</b>	0.002191	0.002191	0.004382	0.004382
<b>Var.</b>	4.8E-06	4.8E-06	1.92E-05	1.92E-05

Inicial	Sur	Este	Oeste	Norte
1	0.26733	0.26067	0.278	0.27133
2	0.26733	0.262	0.278	0.27267
3	0.266	0.262	0.278	0.27267
4	0.26733	0.26067	0.278	0.27133
5	0.266	0.25933	0.278	0.27267
6	0.26733	0.262	0.28	0.27267
7	0.26733	0.25933	0.278	0.27133
8	0.26733	0.262	0.278	0.27267
9	0.26733	0.262	0.278	0.27133
10	0.266	0.26067	0.28	0.27267
<b>Pro.</b>	0.266931	0.261067	0.2784	0.272134
<b>Des. Est.</b>	0.000642	0.001098	0.000843	0.000692
<b>Var.</b>	4.13E-07	1.21E-06	7.11E-07	4.79E-07

Acero A335 Grado P-22. Pérdida de Espesor en pulgadas.

	Inicial	-	Final	=	
Zona Inferior (sur)	266.9		259		0.0079
Este	261		235.6		0.0254
Oeste	278.4		257.2		0.0212
Zona superior (norte)	272.1		253.2		0.0189

A335 P22	in	mm
Zona Inferior (sur)	0.0079	<b>0.2006</b>
Este	0.0254	<b>0.64516</b>
Oeste	0.0212	<b>0.53848</b>
Zona superior (norte)	0.0189	<b>0.48006</b>



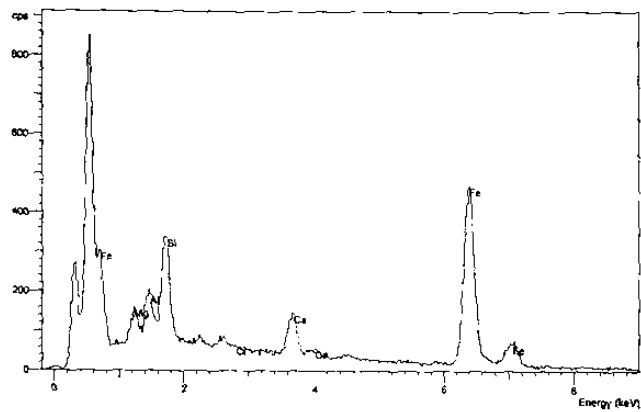
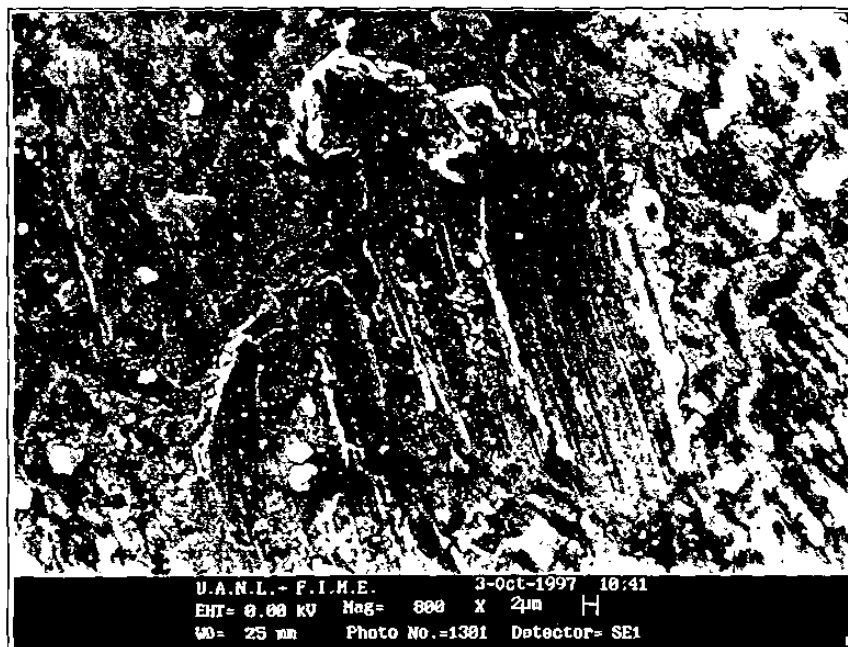


Figura 1. Capa de fierro esponja, adherida a la superficie del acero bajo carbono.

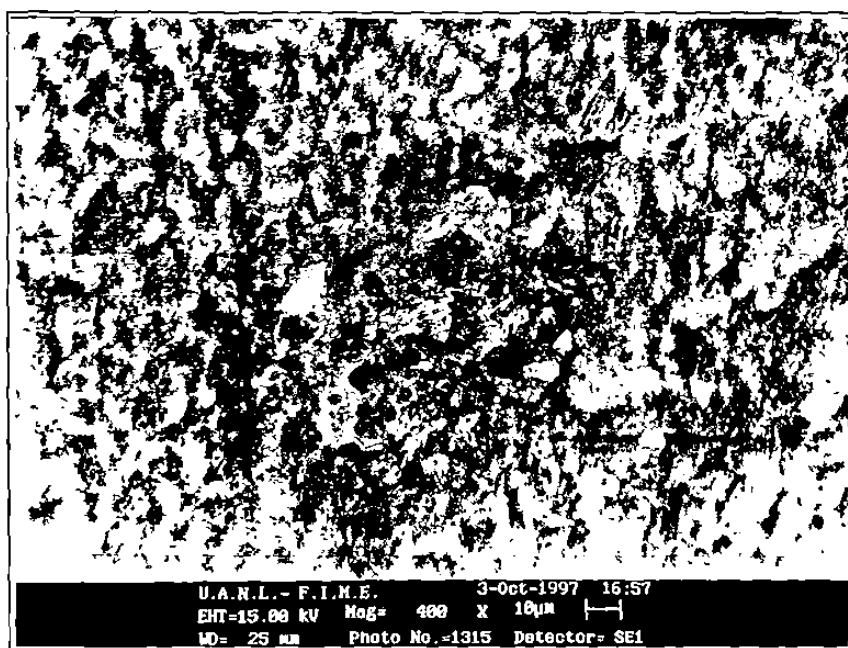
## **APÉNDICE**

### **D**

## **IMÁGENES DE ÁREAS DE DEGASTE DE LOS RECUBRIMIENTOS**

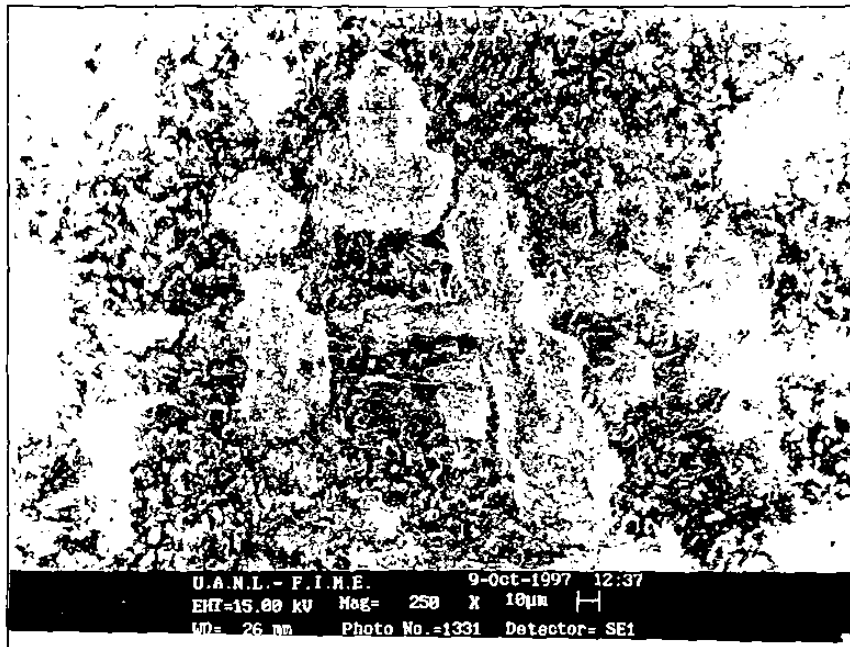


a)

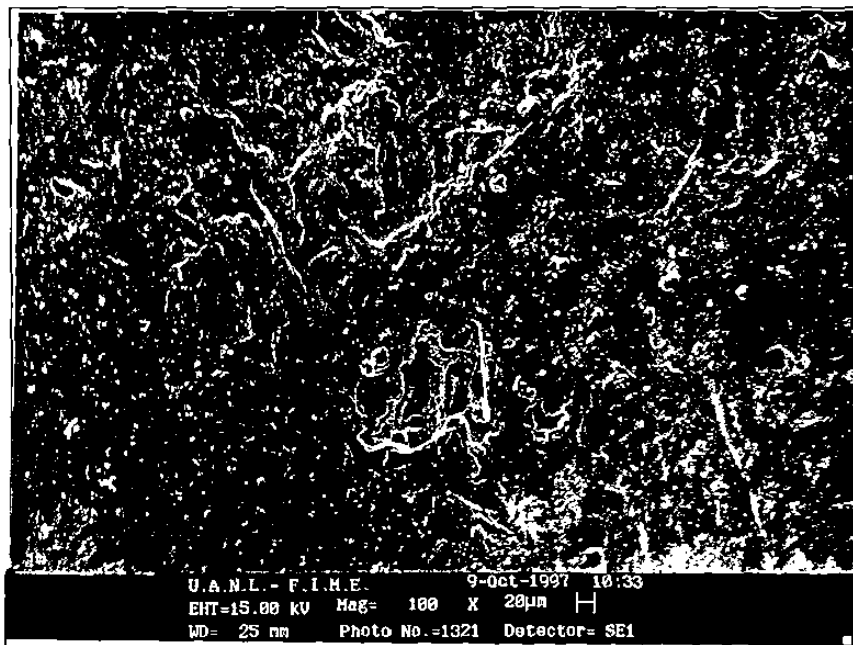


b)

Figura 1. Desgaste en la superficie del recubrimiento R2 a) a 0° paralelo al flujo de sólidos y b) a 30° con respecto al flujo.



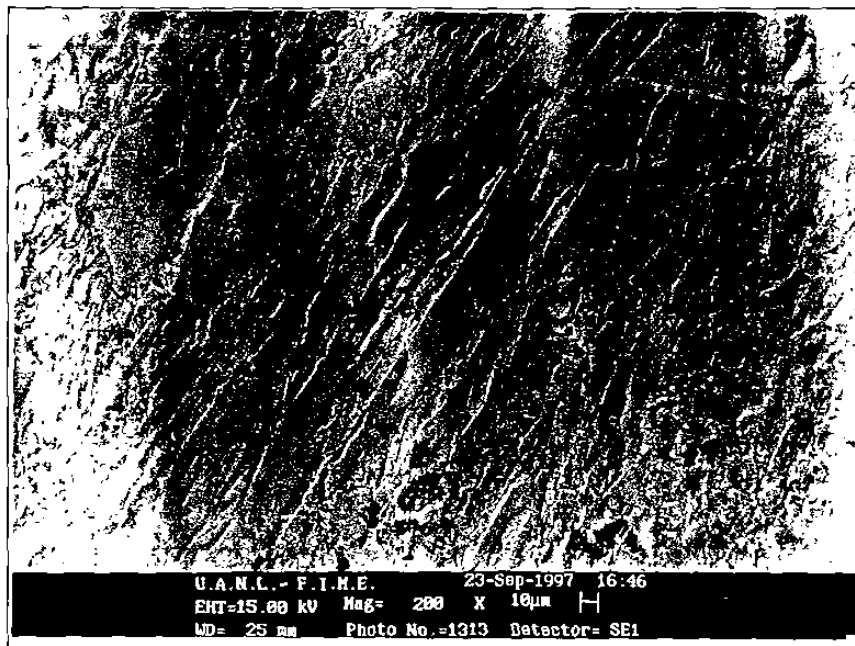
a)



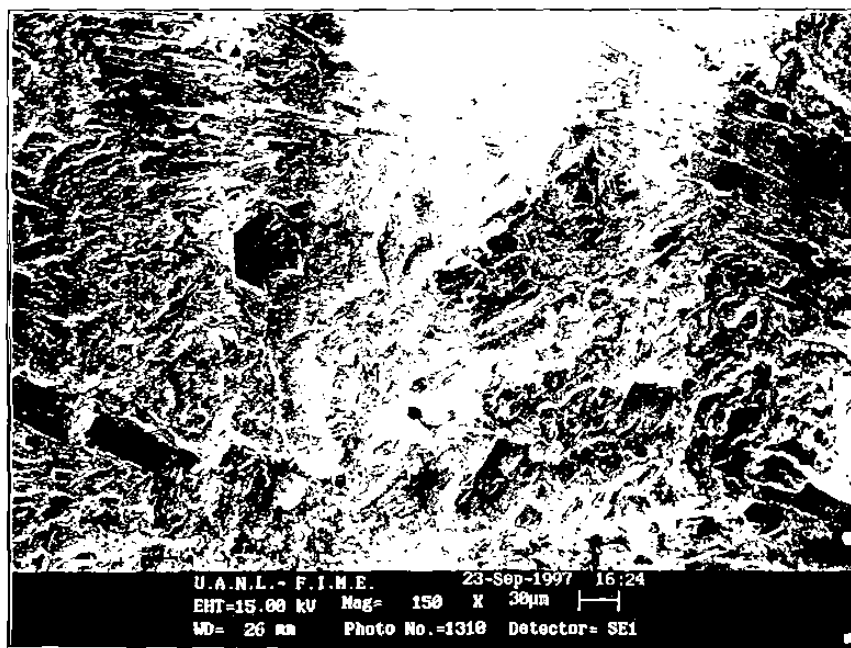
b)

Figura 2. Desgaste en la superficie del recubrimiento R3 a) a 0° paralelo al flujo de sólidos y b) a 30° con respecto al flujo.



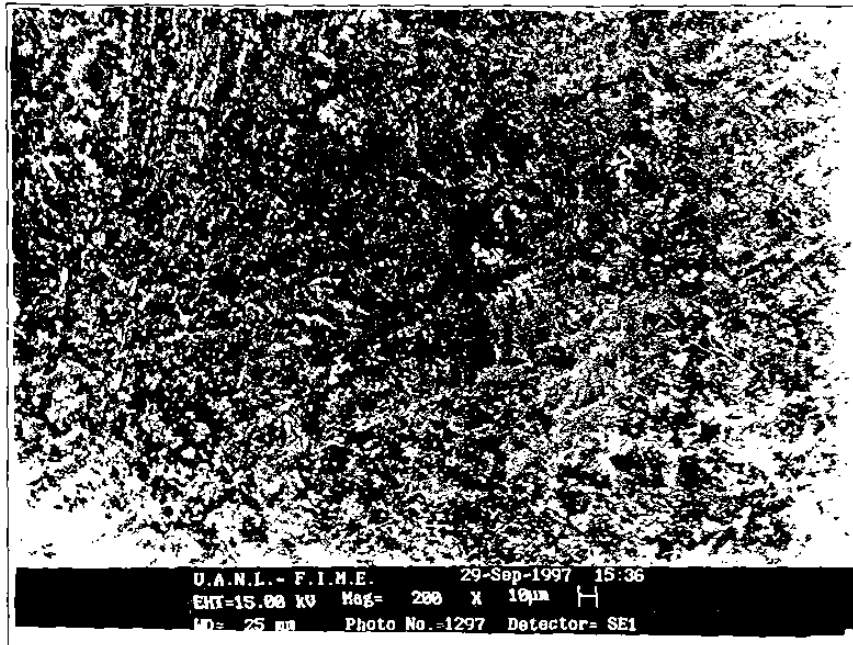


a)

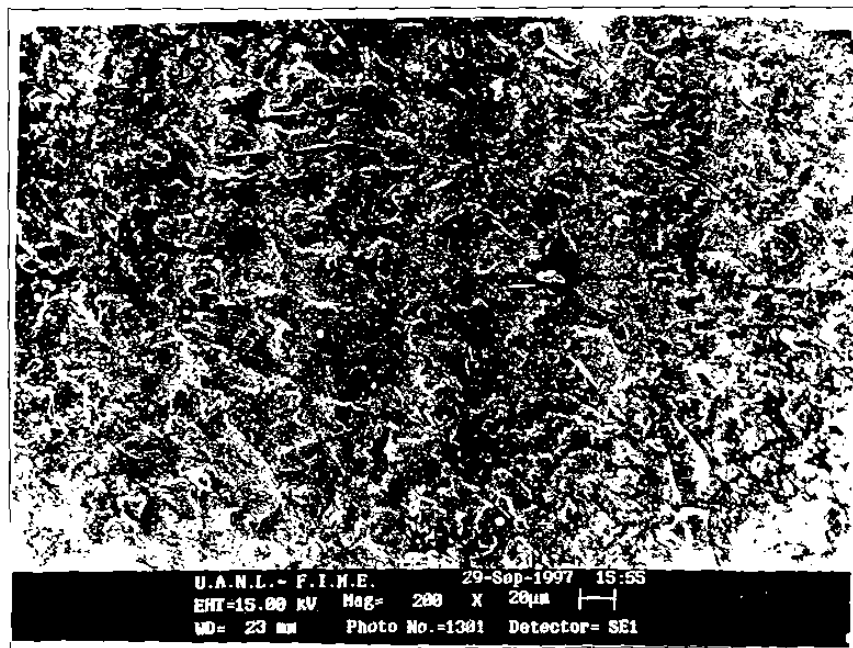


b)

Figura 3. Desgaste en la superficie del recubrimiento R4 a) a  $0^\circ$  paralelo al flujo de sólidos y b) a  $30^\circ$  con respecto al flujo.



a)



b)

Figura 4. Desgaste en la superficie del recubrimiento R5 a) a  $0^\circ$  paralelo al flujo de sólidos y b) a  $30^\circ$  con respecto al flujo.

## **APÉNDICE**

### **E**

#### **ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA ÁREAS Y PROFUNDIDAD DE DESGASTE**

## PRUEBA DE HIPOTESIS SOBRE LAS MEDIAS DE DOS DISTRIBUCIONES NORMALES, CON VARIANZAS CONOCIDAS

### CALCULO DE LAS PRUEBAS t

#### CASO 1 $\sigma = \sigma$

$$S_p^2 = (n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2 / (n_1 + n_2 - 2)$$

$$t_o = (X_1 - X_2) / S_p \left[ \left( \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right]^{1/2}$$

SI  $H_o: \mu_1 = \mu_2$  es verdadera  $t_o$  se disminuye como  $t_{n_1 + n_2 - 2}$  por tanto si  $t_o > t_{\alpha/2, n_1 + n_2 - 2}$  o si  $t_o < -t_{\alpha/2, n_1 + n_2 - 2}$  se rechaza  $H_o$

#### CASO 2 $\sigma \neq \sigma$

$$t_o^* = (X_1 - X_2) / \left[ \left( \frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2} \right) \right]^{1/2}$$

$$v = \left[ \frac{(S_1^2/n_1 + S_2^2/n_2)^2}{(S_1^2/n_1)^2/(n_1+1) + (S_2^2/n_2)^2/(n_2+1)} \right] - 2$$

si  $t_o \neq -t_{\alpha/2, v}$  no puede rechazarse a  $H_o: \mu_1 = \mu_2$

## PRUEBA DE HIPOTESIS SOBRE LAS VARIANZAS DE DOS DISTRIBUCIONES NORMALES

### CALCULO DE LAS PRUEBAS F

$$F_o = S_1^2 / S_2^2$$

SI  $H_o: \sigma_1 = \sigma_2$  es verdadera se rechazaria a  $H_o$  si  $F_o < F_{1-\alpha/2, n_1 - 1, n_2 - 1}$  o si  $F_o > F_{\alpha/2, n_1 - 1, n_2 - 1}$

### PRUEBAS F y T

Comparación de los datos de cada aleación a los dos ángulos de impacto

MATERIAL	PRU. F	PRU. T
R1-R1	$\sigma = \sigma$	$\mu \neq \mu$
R2	$\sigma = \sigma$	$\mu \neq \mu$
R3	$\sigma = \sigma$	$\mu \neq \mu$
R4	$\sigma = \sigma$	$\mu \neq \mu$
R5	$\sigma = \sigma$	$\mu \neq \mu$
R6	$\sigma \neq \sigma$	$\mu \neq \mu$
R7	$\sigma \neq \sigma$	$\mu \neq \mu$
R8	$\sigma = \sigma$	$\mu \neq \mu$

## PRUEBAS F y t

Comparación de todas las combinaciones de aleaciones a los dos ángulos de impacto

No	MATE	PRU. F A 0°	PRU. F A 30°	PRU. T A 0°	PRU. T A 30°
1	R1-R2	$\sigma \neq \sigma$	$\sigma \neq \sigma$	$\mu \neq \mu$	$\mu \neq \mu$
2	R1-R3	$\sigma \neq \sigma$	$\sigma = \sigma$	$\mu \neq \mu$	$\mu = \mu$
3	R1-R4	$\sigma \neq \sigma$	$\sigma \neq \sigma$	$\mu \neq \mu$	$\mu \neq \mu$
4	R1-R5	$\sigma \neq \sigma$	$\sigma \neq \sigma$	$\mu = \mu$	$\mu \neq \mu$
5	R1-R6	$\sigma \neq \sigma$	$\sigma = \sigma$	$\mu \neq \mu$	$\mu = \mu$
6	R1-R7	$\sigma \neq \sigma$	$\sigma = \sigma$	$\mu \neq \mu$	$\mu = \mu$
7	R1-R8	$\sigma = \sigma$	$\sigma = \sigma$	$\mu \neq \mu$	$\mu \neq \mu$
8	R2-R3	$\sigma \neq \sigma$	$\sigma \neq \sigma$	$\mu \neq \mu$	$\mu \neq \mu$
9	R2-R4	$\sigma \neq \sigma$	$\sigma = \sigma$	$\mu \neq \mu$	$\mu = \mu$
10	R2-R5	$\sigma \neq \sigma$	$\sigma = \sigma$	$\mu \neq \mu$	$\mu = \mu$
11	R2-R6	$\sigma \neq \sigma$	$\sigma \neq \sigma$	$\mu \neq \mu$	$\mu \neq \mu$
12	R2-R7	$\sigma \neq \sigma$	$\sigma \neq \sigma$	$\mu \neq \mu$	$\mu \neq \mu$
13	R2-R8	$\sigma = \sigma$	$\sigma \neq \sigma$	$\mu \neq \mu$	$\mu = \mu$
14	R3-R4	$\sigma \neq \sigma$	$\sigma \neq \sigma$	$\mu \neq \mu$	$\mu \neq \mu$
15	R3-R5	$\sigma \neq \sigma$	$\sigma = \sigma$	$\mu \neq \mu$	$\mu \neq \mu$
16	R3-R6	$\sigma = \sigma$	$\sigma = \sigma$	$\mu \neq \mu$	$\mu = \mu$
17	R3-R7	$\sigma = \sigma$	$\sigma = \sigma$	$\mu \neq \mu$	$\mu = \mu$
18	R3-R8	$\sigma \neq \sigma$	$\sigma = \sigma$	$\mu \neq \mu$	$\mu \neq \mu$
19	R4-R5	$\sigma = \sigma$	$\sigma = \sigma$	$\mu \neq \mu$	$\mu = \mu$
20	R4-R6	$\sigma \neq \sigma$	$\sigma \neq \sigma$	$\mu \neq \mu$	$\mu \neq \mu$
21	R4-R7	$\sigma \neq \sigma$	$\sigma \neq \sigma$	$\mu \neq \mu$	$\mu \neq \mu$
22	R4-R8	$\sigma \neq \sigma$	$\sigma \neq \sigma$	$\mu \neq \mu$	$\mu \neq \mu$
23	R5-R6	$\sigma \neq \sigma$	$\sigma = \sigma$	$\mu \neq \mu$	$\mu \neq \mu$
24	R5-R7	$\sigma \neq \sigma$	$\sigma \neq \sigma$	$\mu \neq \mu$	$\mu \neq \mu$
25	R5-R8	$\sigma = \sigma$	$\sigma = \sigma$	$\mu \neq \mu$	$\mu = \mu$
26	R6-R7	$\sigma = \sigma$	$\sigma = \sigma$	$\mu \neq \mu$	$\mu = \mu$
27	R6-R8	$\sigma \neq \sigma$	$\sigma \neq \sigma$	$\mu \neq \mu$	$\mu = \mu$
28	R7-R8	$\sigma \neq \sigma$	$\sigma \neq \sigma$	$\mu \neq \mu$	$\mu \neq \mu$

**CALCULO DE INTERVALO DE CONFIANZA SOBRE LA MEDIA DE UNA DISTRIBUCION NORMAL, VARIANZA DESCONOCIDA**

$$X - t_{\alpha/2} S/(n^{*1/2}) < \mu < X + t_{\alpha/2} S/(n^{*1/2})$$

donde:

$\mu$  : media desconocida

S : varianza muestral

NOMBRE	DATOS	NOMBRE	DATOS	NOMBR	DATOS
R1 0°	X=330.0427 $\sigma = 68.97288$ n = 11 s =68.9772	R1 30°	x= 895.6629 $\sigma = 397.3985$ n = 13 s = 397.3985	R7 0°	X= 212.408462 $\sigma = 74.221730$ n = 13 s = 74.2217306

$$283.70 < \mu < 376.37$$

$$655.50 < \mu < 1135.82$$

$$167.55 < \mu < 257.2$$

NOMBRE	DATOS	NOMBRE	DATOS	NOMBR	DATOS
R5 30°	X=966.99417 $\sigma = 234.76208$ n = 12 s = 234.76208	R5 0°	x= 214.8 $\sigma = 103.94765$ n = 14 s = 103.94765	R7 30°	X= 759.4417 $\sigma = 397.0924$ n = 12 s = 397.0924

$$830.77 < \mu < 1103.21$$

$$155.08 < \mu < 274.51$$

$$567.139 < \mu < 1011.74$$

NOMBRE	DATOS	NOMBR	DATOS
R2 30°	X= 1009.4 $\sigma = 334.3604$ n = 11 s = 334.3604	R2 0°	X= 776.9392 $\sigma = 252.3301$ n = 12 s = 252.3301

$$784.78 < \mu < 1234.01$$

$$616.61 < \mu < 937.26$$

NOMBRE	DATOS	NOMBR	DATOS
R6 0°	X= 906.0617 $\sigma = 495.417$ n = 12 s = 495.417	R6 30°	X= 3213.92 $\sigma = 695.2871$ n = 12 s = 695.2871

$$591.291 < \mu < 1220.83$$

$$2772.15 < \mu < 3655.68$$

### CALCULO DE INTERVALO DE CONFIANZA SOBRE DIFERENCIA DE DOS MEDIAS, CONOCIDAS LAS VARIANZAS

$$X1 - X2 - Z_{\alpha/2} (\sigma_1^2/n_1 + \sigma_2^2/n_2)^{1/2} < \mu_1 - \mu_2 < X1 - X2 + Z_{\alpha/2} (\sigma_1^2/n_1 + \sigma_2^2/n_2)^{1/2}$$

donde:

$\mu_1$  : media desconocida

$\sigma_1$  : varianza conocida

$\mu_2$  : media desconocida

$\sigma_2$  : varianza conocida

PARA R1 - R2 A 0°

NOMBRE	DATOS
R1	R2
$\bar{X}=330.0427$	$X=776.9392$
$\sigma = 68.97288$	$\sigma = 252.3301$
$n=11$	$n=12$

$$438.30 < \mu_1 - \mu_2 < 455.49$$

PARA R1 - R5 A 30°

NOMBRE	DATOS
R1	R5
$\bar{X}=330.0427$	$X=966.99417$
$\sigma = 68.97288$	$\sigma = 234.7$
$n=11$	$n=12$

$$628.59 < \mu_1 - \mu_2 < 645.31$$

PARA R1 - R7 A 30°

NOMBRE	DATOS
R1	R7
$\bar{X}=330.0427$	$X=759.4417$
$\sigma = 68.97288$	$\sigma = 397.0924$
$n=11$	$n=12$

$$419.07 < \mu_1 - \mu_2 < 439.71$$

PARA R2 - R6 A 0°.

NOMBRE	DATOS
R2	R6
$X=1009.4$	$X=906.0617$
$\sigma = 334.3604$	$\sigma = 495.417$
$n=11$	$n=12$

$$89.11 < \mu_1 - \mu_2 < 116.96$$

PARA R2 - R7 A 30°

NOMBRE	DATOS
R2	R7
$X=1009.4$	$X=759.4417$
$\sigma=334.360$	$\sigma = 397.0924$
$n=11$	$n=12$

$$236.85 < \mu_1 - \mu_2 < 263.06$$

PARA R3 - INOX A 0°

NOMBRE	DATOS
R3	INOX
$X=1286.13$	$X=1661.923$
$\sigma=687.599$	$\sigma = 601.6689$
$n=12$	$n=12$

$$358.74 < \mu_1 - \mu_2 < 392.84$$

PARA R3 - R6 A 0°

NOMBRE	DATOS
R3	R6
$X=1286.13$	$X=906.0617$
$\sigma=687.599$	$\sigma = 495.417$
$n=12$	$n=12$

$$363.73 < \mu_1 - \mu_2 < 396.34$$

PARA R3 - R4 A 0°

NOMBRE	DATOS
R3	R4
$X=1286.13$	$X=1558.6638$
$\sigma = 687.59$	$\sigma = 287.6471$
$n=12$	$n=13$

$$257.87 < \mu_1 - \mu_2 < 287.19$$

PARA INOX - R4 A 0°  
 NOMBRE DATOS  
 INOX R4  
 $X=1661.92$   $X=1558.6638$   
 $\sigma=601.6689$   $\sigma=287.6471$   
 $n=12$   $n=13$   
 $89.27 < \mu_1 - \mu_2 < 117.24$

PARA R2 - R5 A 30°  
 NOMBRE DATOS  
 R2 R5  
 $X=1009.4$   $X=214.8$   
 $\sigma=334.3604$   $\sigma=103.96$   
 $n=11$   $n=14$   
 $784 < \mu_1 - \mu_2 < 804.71$

PARA R5 - R7 A 0°  
 NOMBRE DATOS  
 R5 R7  
 $X=214.8$   $X=212.4084$   
 $\sigma=103.9476$   $\sigma=74.2217$   
 $n=14$   $n=13$   
 $-3.57 < \mu_1 - \mu_2 < 8.35$

PARA INOX - R4 A 0°  
 NOMBRE DATOS  
 INOX R4  
 $X=1661.9$   $X=1558.6638$   
 $\sigma=601.668$   $\sigma=287.64$   
 $n=12$   $n=13$   
 $89.27 < \mu_1 - \mu_2 < 117.24$

PARA R5 - R7 A 30°  
 NOMBRE DATOS  
 R5 R7  
 $X=966.994$   $X=759.4417$   
 $\sigma=234.7$   $\sigma=397.0924$   
 $n=12$   $n=12$   
 $195.6 < \mu_1 - \mu_2 < 219.48$



## INTERVALO DE CONFIANZA SOBRE LA RAZON ENTRE LAS VARIANZAS DE DOS DISTRIBUCIONES NORMALES

$$S1^2/S2^2 F_{1-\alpha/2, n2-1, n1-1} < \sigma1^2/\sigma2^2 < S1^2/S2^2 F_{\alpha/2, n2-1, n1-1}$$

donde:

S1 : varianza conocida

$\sigma1$  : varianza desconocida

S2 : varianza conocida

$\sigma2$  : varianza desconocida

NOMBRE	DATOS	NOMBRE	DATOS
R1	R2	R1	R5
(S)2 = 4757.258	(S2)2 = 63670.47	(s1)2 = 157925.56	(s2)2 = 55113.23
n = 11	n = 12	n = 13	n = 12
<b>0.02615 &lt; <math>\sigma1/\sigma2</math> &lt; 0.21294</b>		<b>1.025 &lt; <math>\sigma1/\sigma2</math> &lt; 7.99</b>	

NOMBRE	DATOS	NOMBRE	DATOS
R1 30°	R7	R2 a 0°	R6
(s1)2 = 157925.56	(s2)2 = 157682.37	(S1)2 = 63670.47	(S2)2 = 245438
n = 13	n = 12	n = 12	N = 12
<b>0.358 &lt; <math>\sigma1/\sigma2</math> &lt; 2.794</b>		<b>0.0918 &lt; <math>\sigma1/\sigma2</math> &lt; 0.731</b>	

NOMBRE	DATOS	NOMBRE	DATOS
R2 a 30°	R5	R2 a 30°	R7
(S1)2 = 111796.8	(S2)2 = 10805.11	(S1)2 = 111796.8	(S2)2 = 157682.3
n = 11	N = 14	n = 11	n = 12
<b>3.869 &lt; <math>\sigma1/\sigma2</math> &lt; 27.62</b>		<b>0.2481 &lt; <math>\sigma1/\sigma2</math> &lt; 2.02065</b>	

NOMBRE	DATOS
R5 30°	R7
(S1)2 = 55113.23	(S2)2 = 157682.3
n = 12	n = 12
<b>0.12373 &lt; <math>\sigma1/\sigma2</math> &lt; 0.9856</b>	

### Intervalo de confianza sobre la diferencia entre las medias de las distribuciones, varianzas desconocidas

$$s_p = (n_1 - 1)S_1 + (n_2 - 1)S_2 / n_1 + n_2 - 2$$

donde:

S1 Y S2 son estimaciones de la varianza comun  $\sigma$

#### Intervalo bilateral de confianza

$$(X_1 - X_2) - t_{\alpha/2, n_1 + n_2 - 2} S_p \sqrt{1/(n_1 + 1/n_2)} < \mu_1 - \mu_2 < (X_1 - X_2) + t_{\alpha/2, n_1 + n_2 - 2} S_p \sqrt{1/(n_1 + 1/n_2)}$$

NOMBRE	DATOS	NOMBRE	DATOS
R1 0°	R2	R1 30°	R5
x=330.042	x=776.9392	x= 895.6629	x= 966.99417
$\sigma=68.97288$	$\sigma=252.33$	$\sigma=397.3985$	$\sigma= 234.76208$
n=11	n=12	n=13	n=12
(s)2= 4757.258	(s)2= 63670.47	(s)2= 157925.56	(s)2= 55113.2
(SP)2= 35616.56		(SP)2= 108754.44	
<b>283.039 &lt; <math>\mu_1 - \mu_2</math> &lt; 610.75</b>		<b>*253.99 &lt; <math>\mu_1 - \mu_2</math> &lt; 396.65</b>	
NOMBRE	DATOS	NOMBRE	DATOS
R1 30°	R7	R2 0°	R6
x= 895.6629	x=759.4417	x= 776.9392	x= 906.0617
$\sigma= 397.3985$	$\sigma=397.0924$	$\sigma= 252.3301$	$\sigma= 495.417$
n=13	n=12	n=12	n=12
(s)2= 157925.56	(s)2= 157682.3741	(s)2= 63670.47	(s)2= 245438
(SP)2= 157809.0972		(SP)2= 154554.23	
<b>*192.80 &lt; <math>\mu_1 - \mu_2</math> &lt; 465.22</b>		<b>*203.74 &lt; <math>\mu_1 - \mu_2</math> &lt; 461.99</b>	
NOMBRE	DATOS	NOMBRE	DATOS
R2 30°	R7	R2 0°	R5
x= 1009.4	x=759.4417	x= 1009.4	x= 214.8
$\sigma= 334.3604$	$\sigma=397.0924$	$\sigma= 334.36$	$\sigma= 103.94765$
n=11	n=12	n=11	n=14
(s)2= 111796.8	(s)2= 157682.3	(s)2= 11796.8	(s)2= 10805.1
(SP)2= 135832.06		(SP)2= 11236.28	
<b>*70.031 &lt; <math>\mu_1 - \mu_2</math> &lt; 569.94</b>		<b>706.234 &lt; <math>\mu_1 - \mu_2</math> &lt; 882.96</b>	
NOMBRE	DATOS		
R5 30°	R7		
x= 966.99417	x=759.4417		
$\sigma= 234.76208$	$\sigma=397.0924$		
n=12	n=12		
(s)2= 55113.23	(s)2= 157682.3		
(SP)2= 106397.7			
<b>*68.63 &lt; <math>\mu_1 - \mu_2</math> &lt; 483.73</b>			

Determinación de la profundidad promedio de desgaste hzmáx.  
por análisis del perfil de rugosidad.

INOX a 0°		INOX a 30°	
			20
			20
			30
	8		30
	6		20
	9		30
	9		25
	5.5		30
	9.5		35
	8		40
<b>prom.</b>	<b>7.86</b>	<b>prom.</b>	<b>28.00</b>
<b>des.est.</b>	<b>1.43</b>	<b>des.est.</b>	<b>6.40</b>
<b>R1 a 0°</b>		<b>R1 a 30°</b>	
	3		3
	3.5		5
	1.5		6
	2		8
	2		12
	2		12
<b>prom.</b>	<b>2.40</b>		6
<b>des.est.</b>	<b>0.73</b>		7
			4.6
			11.5
			5
			6
		<b>prom.</b>	<b>7.18</b>
		<b>des.est.</b>	<b>2.94</b>
<b>R2 a 0°</b>		<b>R2 a 30°</b>	
	4		4.5
	7		13
	3		5
	3		5.8
	2		10
	2.5		13
	5.6		8
			11
<b>prom.</b>	<b>3.87</b>	<b>prom.</b>	<b>8.79</b>
<b>des.est.</b>	<b>1.68</b>	<b>des.est.</b>	<b>3.24</b>

Determinación de la profundidad promedio de desgaste hzmáx.  
por análisis del perfil de rugosidad.

**R3 a 0°**

7  
10  
2.8  
8  
8  
4  
10

<b>prom.</b>	<b>7.11</b>
<b>des.est.</b>	<b>2.71</b>

**R3 a 30°**

20  
15  
9  
11  
10  
17  
10  
12  
8

<b>prom.</b>	<b>12.44</b>
<b>des.est.</b>	<b>3.80</b>

**R4 a 0°**

12.5  
3  
2  
7.5  
3  
9.6  
3.5  
7  
3  
2  
6  
2.5  
3.3  
15  
8.5  
2

<b>prom.</b>	<b>5.65</b>
<b>des.est.</b>	<b>3.92</b>

**R4 a 30°**

20  
15  
9.2  
16.5  
6.6  
28  
26  
26  
27  
13.5  
30  
20  
20  
30  
2  
21.5

<b>prom.</b>	<b>19.46</b>
<b>des.est.</b>	<b>8.22</b>

**R5 a 30°**

10  
10  
10  
8

<b>prom.</b>	<b>9.50</b>
<b>des.est.</b>	<b>0.87</b>

**R5 a 0°**

1.8  
2  
2.5  
8  
8

<b>prom.</b>	<b>4.46</b>
<b>des.est.</b>	<b>2.90</b>

Determinación de la profundidad promedio de desgaste hzmáx.  
por análisis del perfil de rugosidad.

**R6 a 0°**

8
5
7.4
5.8
4
5.7
6.8
7
4
5
6
6
5.4
9
6.6
6.8
2
6
<b>prom. 5.92</b>
<b>des.est. 1.55</b>

**R6 a 30°**

14
15
13
16.5
10
14
13.5
13.5
13.5
15
13
17
17
15
8.6
8
12
12
13
<b>prom. 13.35</b>
<b>des.est. 2.02</b>

**R7 a 0°**

9.6
5
3.5
5.7
3.5
3.5
3.6
3.7
5
<b>prom. 4.79</b>
<b>des.est. 1.88</b>

**R7 a 30°**

3
4.6
4
<b>prom. 3.87</b>
<b>des.est. 0.66</b>

# RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Dora Irma Martínez Delgado

*Candidato al Grado de Doctor en Ingeniería de Materiales*

Tesis: Desgaste de Recubrimientos Duros en el Transporte Neumático de Hierro de  
Reducción Directa

Dora Irma Martínez Delgado nació en Monterrey, Nuevo León, México, el 12 de Octubre de 1972. Es hija del Sr. Jerónimo Martínez González y de la Sra. Irma Delgado Palacios. Tiene el título de Licenciado en Física obtenido en la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas de la Universidad Autónoma de Nuevo León, habiendo terminado sus estudios profesionales en 1993. En 1996, en la misma Universidad obtiene el grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Ingresó al Doctorado en Ingeniería de Materiales como becario del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) en Septiembre de 1996. *Catedrático de FIME* desde Agosto de 1996. Obtiene el nombramiento de Candidato a Investigador Nacional otorgado por el Sistema Nacional de Investigadores (SNI) durante el periodo del 1 de Julio de 1997 al 30 de Junio del 2000.

