

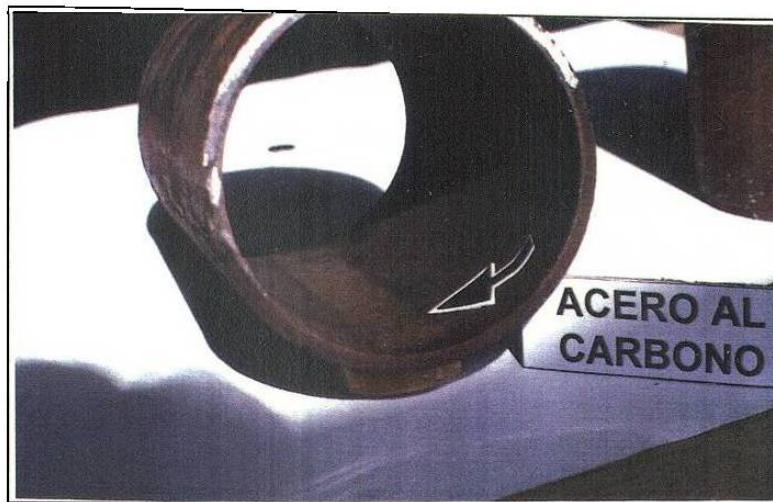
## CAPÍTULO 6

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos en este estudio. Como una primera parte se muestran los tramos de tubos después de removerlos de la línea principal de la planta piloto y se dan los datos obtenidos en la mediciones de espesores, la pérdida estimada de espesor por sección de cada acero y se calcula la constante de desgaste dada por la ecuación de Archard [13]. Como una segunda parte se dan los resultados relacionados directamente con la microestructura como las metalografías para las diferentes condiciones del material y las gráficas de microdureza contra profundidad de la capa de deformación plástica. Con lo referente a la discusión se compara cuantitativamente el volumen perdido de los tres tipos de aceros y cambios observados en las microdurezas. Se propone un modelo que nos indica el desgaste sufrido en condiciones de proceso y se predice el comportamiento a altas temperaturas.

#### 6.1 INSPECCIÓN VISUAL

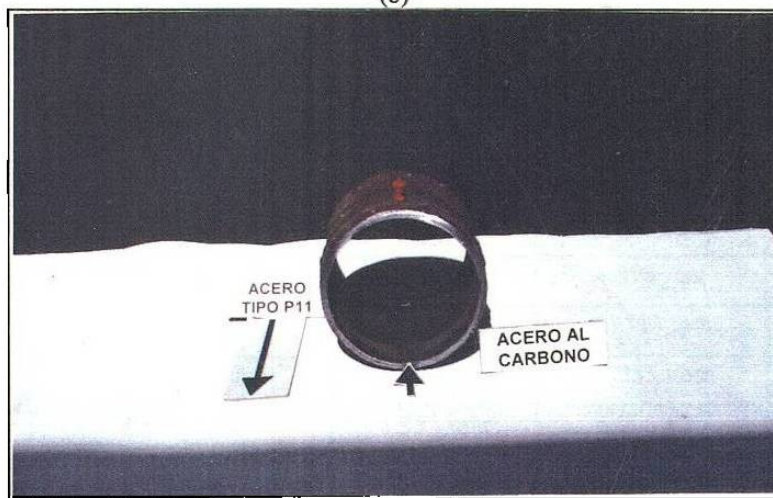
Después de efectuar las pruebas se observa que en la zona sur de los tres tubos se presentó una banda de desgaste. Esta banda se muestra en la figura 6.1 (a), (b) y (c), respectivamente para los aceros al carbono, inoxidable 304 y tipo P-11. Esta tiene un arco de aproximadamente 3 cm a lo largo de los tubos. La banda de desgaste se observa con mayor intensidad en el acero al carbono y presenta adherencia de polvo del fierro esponja transportado. La superficie interna del acero inoxidable 304 se ve relativamente menos dañada. El acero tipo P-11 presenta también esa banda.



(a)



(b)



(c)

Figura 6.1 (a) Fotografía del tramo de tubo del acero al carbono donde se observa en la zona inferior la banda de desgaste. (b) Acero inoxidable 304 también en este acero es apreciable una banda de desgaste de aproximadamente 3 cm de arco. (c) Acero tipo P-11, en este acero se presenta la banda de desgaste muy levemente.

## 6.2 ESPEORES DE PARED

Se realizaron 20 mediciones por cada sección (figura 5.3) del tubo, obteniéndose el promedio, desviación estándar y varianza suponiendo que los datos siguen una distribución normal, por lo cual se tiene un intervalo de confianza del 95%. Estos resultados se tienen antes y después de iniciar la prueba para los aceros al carbono e inoxidable 304, para el acero tipo P-11 se tienen sólo los finales (después de la prueba). Dados los valores finales de los espesores, se obtienen las pérdidas del espesor de la pared para cada sección. En las siguientes tablas se resumen los resultados para cada tipo de acero:

### *ACERO AL CARBONO*

A continuación se describen los datos iniciales de los espesores de cada sección del tubo acero al carbono:

Tabla 6.2.1. Datos iniciales de espesor. Identificación a 90°. Acero al carbono.

	SUR (ZONA INFERIOR)	ESTE	NORTE (ZONA SUPERIOR)	OESTE
PROMEDIO	5.024 mm	5.003 mm	4.993 mm	5.044 mm
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	0.4	0.6320	0.583	0.734
VARIANZA	0.16	0.4	0.34	0.54

En la siguiente tabla se muestran los promedios de cada sección del tubo desgastado en cuatro diferentes posiciones, la distancia promedio de cada posición es aproximadamente 10 cm.

Tabla 6.2.2. Espesores finales del acero al carbono.

	SUR (ZONA INFERIOR)	ESTE	NORTE (ZONA SUPERIOR)	OESTE
POSICIÓN 1	4.892 mm	5.022 mm	4.998 mm	4.927 mm
POSICIÓN 2	4.8907 mm	4.969 mm	4.9314 mm	4.932 mm
POSICIÓN 3	4.9136 mm	4.9364 mm	4.953 mm	4.902 mm
POSICIÓN 4	4.8717 mm	4.933 mm	4.906 mm	5.012 mm
<b>PROMEDIO</b>	<b>4.892 mm</b>	<b>4.9657 mm</b>	<b>4.9474 mm</b>	<b>4.943 mm</b>
<b>DESVIACIÓN ESTÁNDAR</b>	<b>0.584</b>	<b>1.411</b>	<b>1.34</b>	<b>1.630</b>
<b>VARIANZA</b>	<b>0.341</b>	<b>1.992</b>	<b>1.795</b>	<b>2.659</b>

Diferencias de espesores. La siguiente tabla da los resultados finales de la pérdida de espesor por sección y el porcentaje de desgaste sufrido.

Tabla 6.2.3. Diferencias de espesores y porcentaje de pérdida. Acero al carbono.

	DIFERENCIAS DE ESPESORES	PERDIDA DE ESPESOR(mm)	% DE PERDIDA INICIAL
SUR (ZONA INFERIOR)	5.024 - 4.892 =	0.132	0.026
ESTE	5.003 - 4.965 =	0.0381	0.007
NORTE (ZONA SUPERIOR)	4.993 - 4.947 =	0.0462	0.009
OESTE	5.044 - 4.943 =	0.1016	0.020

Cálculos de la pérdida de volumen y de la constante de Archard para el acero al carbono en la sección sur (zona inferior), dado que es la que sufrió mayor pérdida de espesor.

Datos de las muestras:

Dureza (H):	202 HV
Longitud inicial (L):	30.5 cm
Área de desgaste (A):	2.701 cm <sup>2</sup>
Volumen desgastado (V):	4.70 x 10 <sup>-6</sup> cm <sup>3</sup> /ton
Carga aplicada (W):	3.313 kg

Con la ecuación de Archard [13] para el mecanismo de desgaste abrasivo obtenemos la constante de desgaste que nos indica la probabilidad de desprendimiento de material al estar en contacto con la superficie.

La ecuación (2) indica el máximo volumen de desgaste que puede ocurrir. Sustituyendo los valores anteriores encontramos que el valor para la constante K es de 1.0 x 10<sup>-3</sup> para el acero al carbono.

*ACERO INOXIDABLE TIPO 304*

A continuación se describen los datos iniciales de los espesores de cada sección del tubo acero inoxidable 304:

Tabla 6.2.4. Datos iniciales de espesor. Identificación a 90°. Acero inoxidable.

	SUR (ZONA INFERIOR)	ESTE	NORTE (ZONA SUPERIOR)	OESTE
PROMEDIO	6.148 mm	5.862 mm	6.146 mm	6 mm
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	0.80	0.74	0.83	0.67
VARIANZA	0.64	0.56	0.7	0.46

En la siguiente tabla se muestran los promedios de cada sección del tubo desgastado en cuatro diferentes posiciones, la distancia promedio de cada posición es aproximadamente 10 cm.

Tabla 6.2.5. Espesores finales del acero inoxidable 304.

	SUR (ZONA INFERIOR)	ESTE	NORTE (ZONA SUPERIOR)	OESTE
POSICIÓN 1	6.112 mm	5.878 mm	6.120 mm	6.004 mm
POSICIÓN 2	6.052 mm	5.835 mm	6.151 mm	5.930 mm
POSICIÓN 3	6.024 mm	5.932 mm	6.028 mm	6.031 mm
POSICIÓN 4	6.002 mm	5.859 mm	6.033 mm	5.953 mm
<b>PROMEDIO</b>	<b>6.047 mm</b>	<b>5.876 mm</b>	<b>6.083 mm</b>	<b>5.980 mm</b>
<b>DESVIACIÓN ESTÁNDAR</b>	<b>1.627</b>	<b>1.4</b>	<b>2.11</b>	<b>1.56</b>
<b>VARIANZA</b>	<b>2.648</b>	<b>1.95</b>	<b>4.45</b>	<b>2.45</b>

### Diferencias de espesores

La siguiente tabla da los resultados finales de la pérdida de espesor por sección y el porcentaje de desgaste sufrido.

Tabla 6.2.6. Diferencias de espesores y porcentaje de pérdida. Acero inoxidable.

	DIFERENCIAS DE ESPESORES	PERDIDA DE ESPESOR(mm)	% DE PERDIDA INICIAL
SUR (ZONA INFERIOR)	6.149 - 6.047 =	0.101	0.016
ESTE	5.862 - 5.876 =	-0.014	+ 0.002
NORTE (ZONA SUPERIOR)	6.146 - 6.083 =	0.063	0.010
OESTE	6.0 - 5.979 =	0.019	0.003

Cálculos de la pérdida de volumen y de la constante de Archard para el acero inoxidable en la sección sur (zona inferior), dado que es la que sufrió mayor pérdida de espesor se enfocan los siguientes resultados.

#### Datos de las muestras:

Dureza (H):	294 HV
Longitud inicial (L):	30.5 cm
Área de desgaste (A):	3.454 cm <sup>2</sup>
Volumen desgastado (V):	4.54 x 10 <sup>-6</sup> cm <sup>3</sup> /ton
Carga aplicada (W):	2.93 kg

Con la ecuación de Archard [13] para el mecanismo de desgaste abrasivo obtenemos la constante de desgaste que nos indica la probabilidad de desprendimiento de material al estar en contacto con la superficie.

La ecuación (2) indica el máximo volumen de desgaste que puede ocurrir. Sustituyendo los valores anteriores encontramos que el valor para la constante K es de 1.4 x 10<sup>-3</sup> para el acero inoxidable 304.

### ACERO AISI A335 TIPO P-11

A continuación se describen los datos iniciales de los espesores de cada sección del tubo acero tipo P-11:

Tabla 6.2.7. Datos iniciales de espesor. Identificación a 90°. Acero P-11.

	SUR (ZONA INFERIOR)	ESTE	NORTE (ZONA SUPERIOR)	OESTE
PROMEDIO	6.134 mm	6.172 mm	5.943 mm	5.60 mm
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	5.5	3	6	0.5
VARIANZA	30.25	9	36	0.25

En la siguiente tabla se muestran los promedios de cada sección del tubo desgastado en tres diferentes posiciones, la distancia promedio de cada posición es aproximadamente 8 cm.

Tabla 6.2.8. Espesores finales del acero tipo P-11.

	SUR (ZONA INFERIOR)	ESTE	NORTE (ZONA SUPERIOR)	OESTE
POSICIÓN 1	6.22 mm	5.85 mm	5.82 mm	6.23 mm
POSICIÓN 2	6.19 mm	5.83 mm	5.86 mm	6.23 mm
POSICIÓN 3	6.13 mm	5.70 mm	5.80 mm	6.22 mm
<b>PROMEDIO</b>	<b>6.18 mm</b>	<b>5.79 mm</b>	<b>5.83 mm</b>	<b>6.23 mm</b>
<b>DESVIACIÓN ESTÁNDAR</b>	<b>1.37</b>	<b>2.55</b>	<b>1.07</b>	<b>0.24</b>
<b>VARIANZA</b>	<b>1.89</b>	<b>6.54</b>	<b>1.14</b>	<b>0.06</b>

Diferencias de espesores. La siguiente tabla 6.2.9. da los resultados finales de la pérdida de espesor por sección y el porcentaje de desgaste sufrido.

Tabla 6.2.9. Diferencias de espesores y porcentaje de pérdida. Acero P-11.

	DIFERENCIAS DE ESPESORES	PERDIDA DE ESPESOR(mm)	% DE PERDIDA INICIAL
SUR (ZONA INFERIOR)	6.15 - 6.17 =	-0.013	+0.002
ESTE	6.17 - 5.77 =	0.396	0.064
NORTE (ZONA SUPERIOR)	5.94 - 5.82 =	0.118	0.019
OESTE	5.61 - 6.22 =	-0.614	+0.109

Con respecto a este acero se obtuvieron algunas irregularidades dado que la información inicial de los espesores fue dada a esta investigación, dado que no existió tramo de tubo testigo (sin someterlo a desgaste). Por lo tanto, el valor de pérdida de espesor por diferencia de medición no es confiable para este acero. Sin embargo se realizan mediciones de la zona cercana a la parte sur y sobre esta zona, donde se encuentra una banda de desgaste (figura 6.1 (c)). Estimando esta área se toman los valores para la ecuación (2) de Archard.

Datos de las muestras:

Dureza (H):	243 HV
Longitud inicial (L):	16.5 cm
Área de desgaste (A):	3.31 cm <sup>2</sup>
Volumen desgastado (V):	3.11 x 10 <sup>-7</sup> cm <sup>3</sup> /ton
Carga aplicada (W):	1.5 kg

La ecuación (2) indica el máximo volumen de desgaste que puede ocurrir. Sustituyendo los valores anteriores encontramos que el valor para la constante K es 3.17 x 10<sup>-3</sup> para el acero tipo P-11.

Los resultados de las tablas 6.2.3, 6.2.6, 6.2.9 se representan gráficamente en las figuras 6.2, 6.3 y 6.4 donde se muestra las diferencias de espesor por el total de toneladas transportadas para los tres tipos de aceros en cada sección identificada.



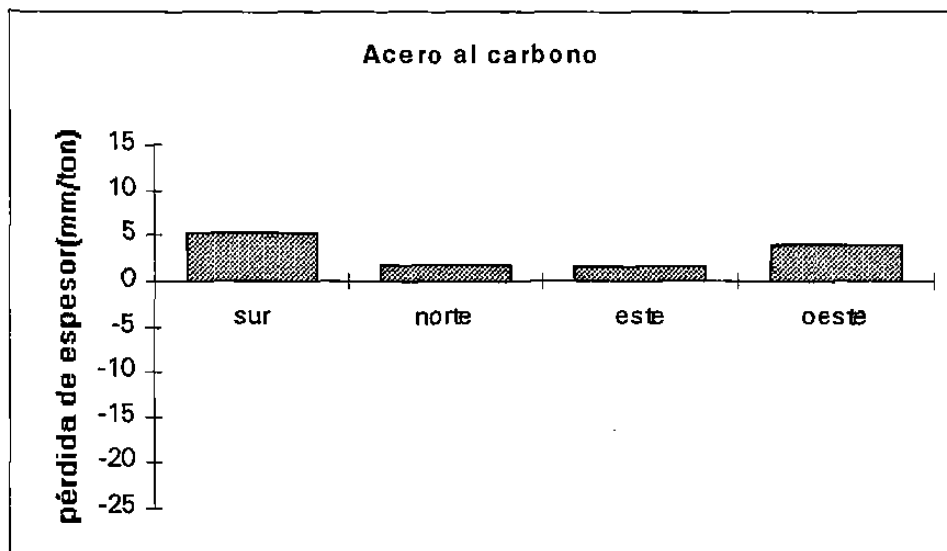


Figura 6.2 Diferencias de espesor de las cuatro secciones del acero 1005.

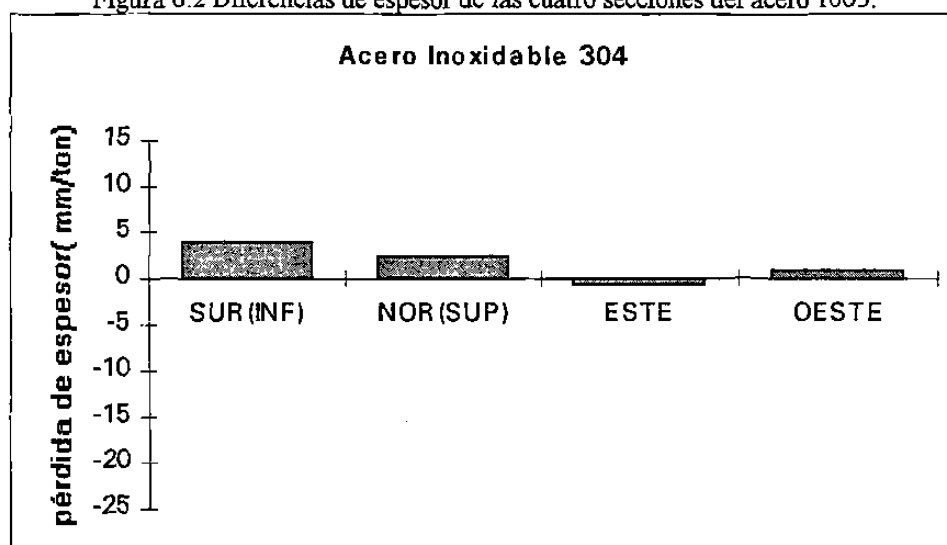


Figura 6.3 Diferencias de espesor de las cuatro secciones del acero inox. 304.

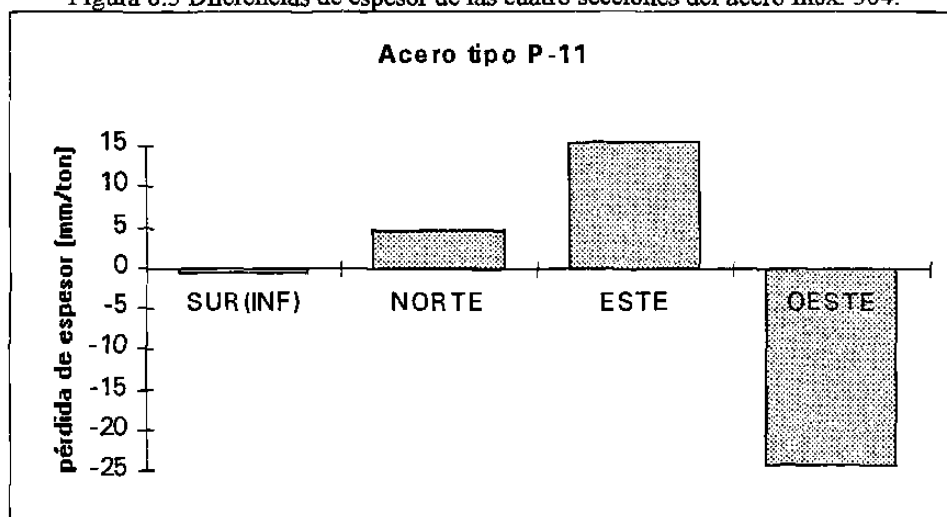


Figura 6.4 Diferencias de espesor de las cuatro secciones del acero tipo P-11.

En las figuras anteriores se grafica la pérdida de espesor por el total de toneladas transportadas que sufrieron las cuatro secciones estudiadas, se puede observar que la zona inferior (sur) tiene la mayor pérdida de espesor, lo que era de esperarse dado que es la que está sometida a altas cargas del material y a bajas velocidades. La zona superior presenta menor pérdida de espesor, esto debido al menor contacto con el flujo de sólidos. Los dos lados del tubo presentan una pérdida de espesor no simétrica, como se observa en las figuras 6.2 y 6.3 tal comportamiento involucra una variación en el flujo de partículas por efecto de presiones de caída puesto que los segmentos fueron colocados en una sección cerca de la válvula rotatoria del reactor de descarga del fierro esponja.

La figura 6.3, también presenta un comportamiento similar que el acero al carbono, la zona sur es la que sufrió mayor pérdida de espesor. En el acero inoxidable se observa que la zona superior tuvo mayor desgaste que los lados del tubo tal medición es considerable y el lado este tiene un incremento de espesor por lo que se tiene dos posibilidades de estos resultados que exista un error en la lecturas iniciales y finales o que exista una probable adherencia del material transportado en la zona donde se observa un incremento de espesor, lo que no fue posible constatar en este trabajo.

La figura 6.4 muestra los resultados del acero tipo P-11, en la que se encuentra una total incongruencia con los otros aceros dado que no se tuvo el segmento de tubería sin desgastar para realizar las mediciones iniciales como en el caso de los otros aceros, por lo tanto teniendo en consideración la importancia de los datos cuantitativos en el desgaste no podemos concluir sobre este acero.

## 6.3 METALOGRAFÍA

### *ACERO AL CARBONO.*

A continuación se describen las micrografías (figuras 6.5, 6.6, 6.7, 6.8) obtenidas del acero al carbono antes y después de someterlo a prueba. Las muestras del acero AISI 1005 presentan una matriz ferrítica con una distribución uniforme de tamaño de grano promedio de  $8.3 \mu\text{m}$  con una desviación estándar de  $2.3 \mu\text{m}$  (tamaño 6 según la norma ASTM E112 - 88) según la figura 6.5. Al obtener la muestra después de la prueba se observa en la figura 6.6 una deformación plástica en la subsuperficie de aproximadamente  $66 \mu\text{m}$  de profundidad, ésta no se encuentra uniformemente en toda el área analizada, por lo que se tiene una variación en la profundidad de la capa deformada plásticamente. Las zonas deformadas presentan un alargamiento de los granos subsuperficiales provocando la formación de microgrietas como se observa en la figura 6.7. Algunas zonas deformadas plásticamente presentan también desprendimientos de material, las cuales pueden llegar hasta  $15 \mu\text{m}$  de profundidad como se observa en la figura 6.8. Debido a que el acero presenta una dureza menor en comparación con los otros dos aceros la deformación que sufrió fue mayor ya que la resistencia a la abrasión es menor, puesto que está relacionada con el contenido de carbono y la formación de carburos.

Las figuras 6.9 (a), (b) muestran el daño sufrido en la zona superior del tubo, en ellas se observa que no ha sufrido un daño severo la parte superior. Las áreas que presentan deformación plástica son de aproximadamente  $25 \mu\text{m}$ , la magnitud de desgaste en esta zona es menor que en la zona inferior del tubo, esto es debido a que no existe un contacto directo con el flujo de sólidos en el transporte de fase densa, aunque existen impactos de sólidos debido a la velocidad de saltación que algunas partículas desarrollan en la zona superior del material.

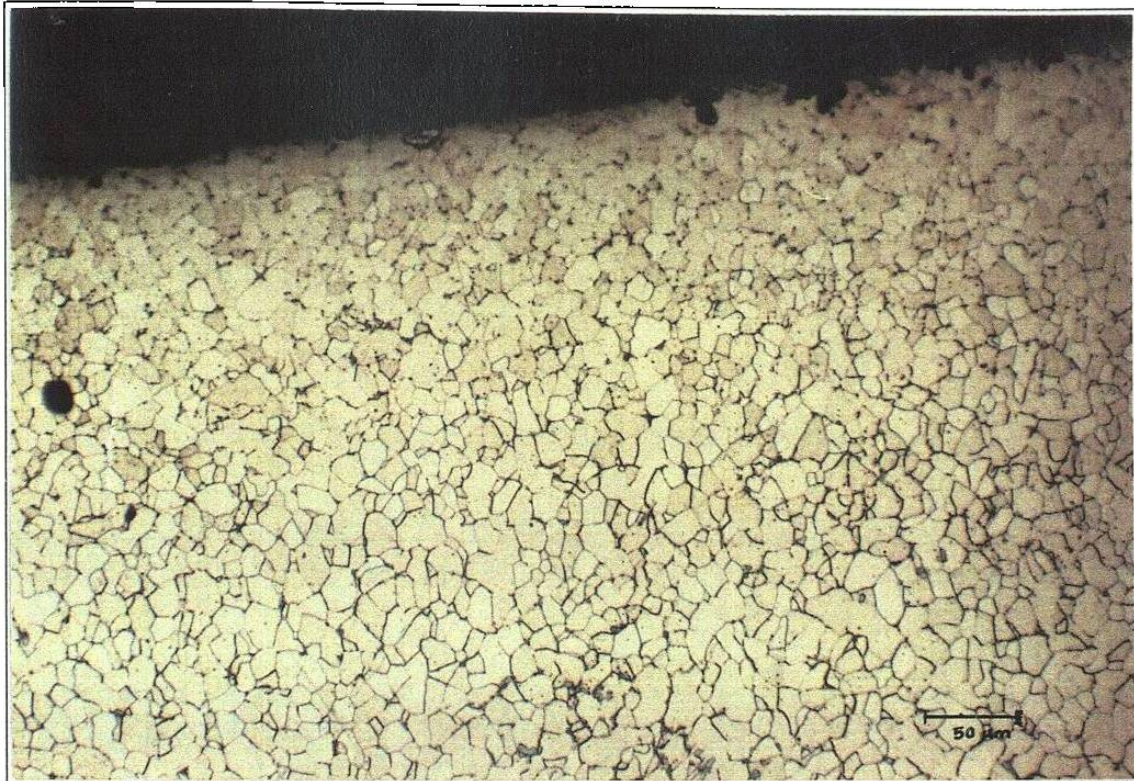


Figura 6.5. Microestructura del AISI 1005 sin desgastar, zona inferior a 200X

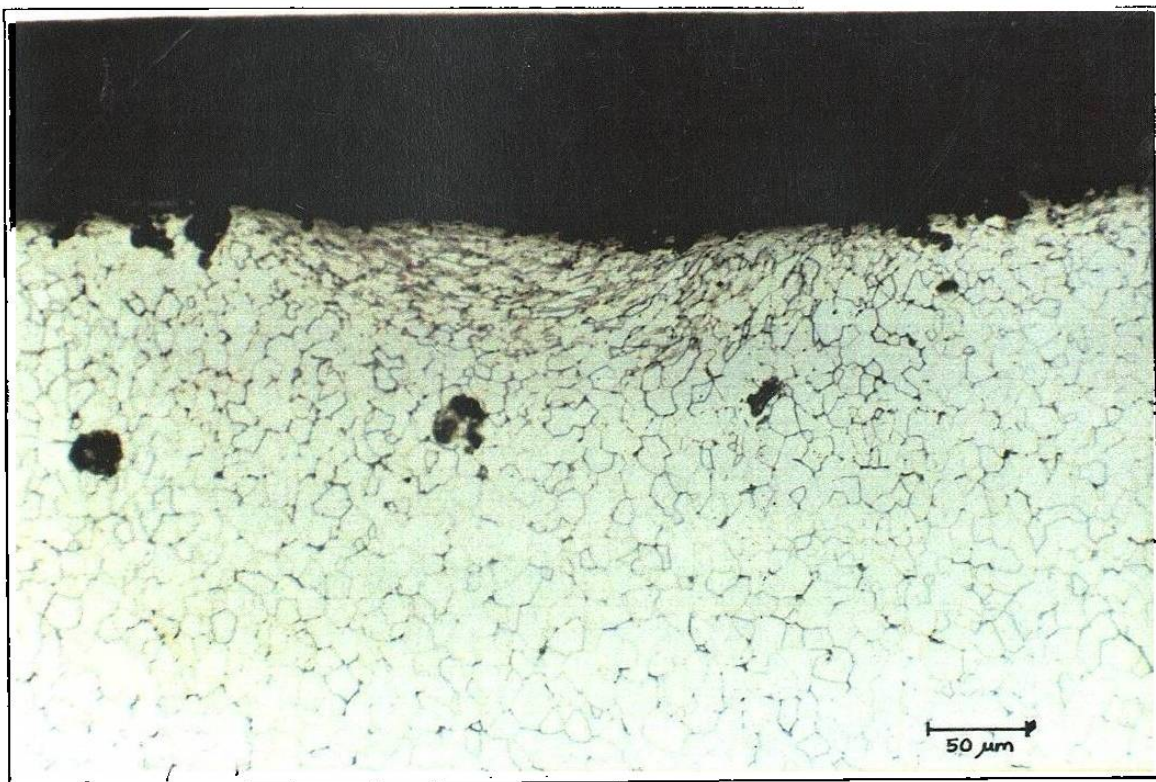


Figura 6.6. Microestructura del AISI 1005 desgastado, zona inferior deformada a 200X



Figura 6.7. AISI 1005 zona inferior desgastada a 400X

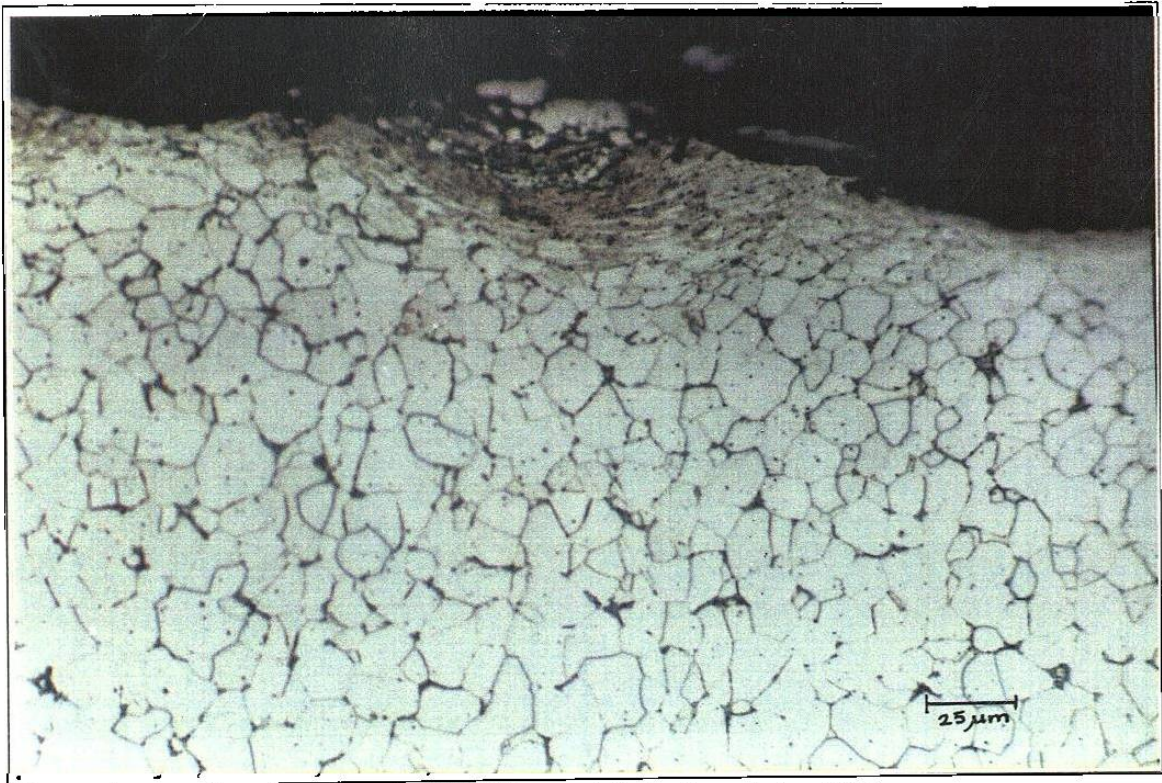
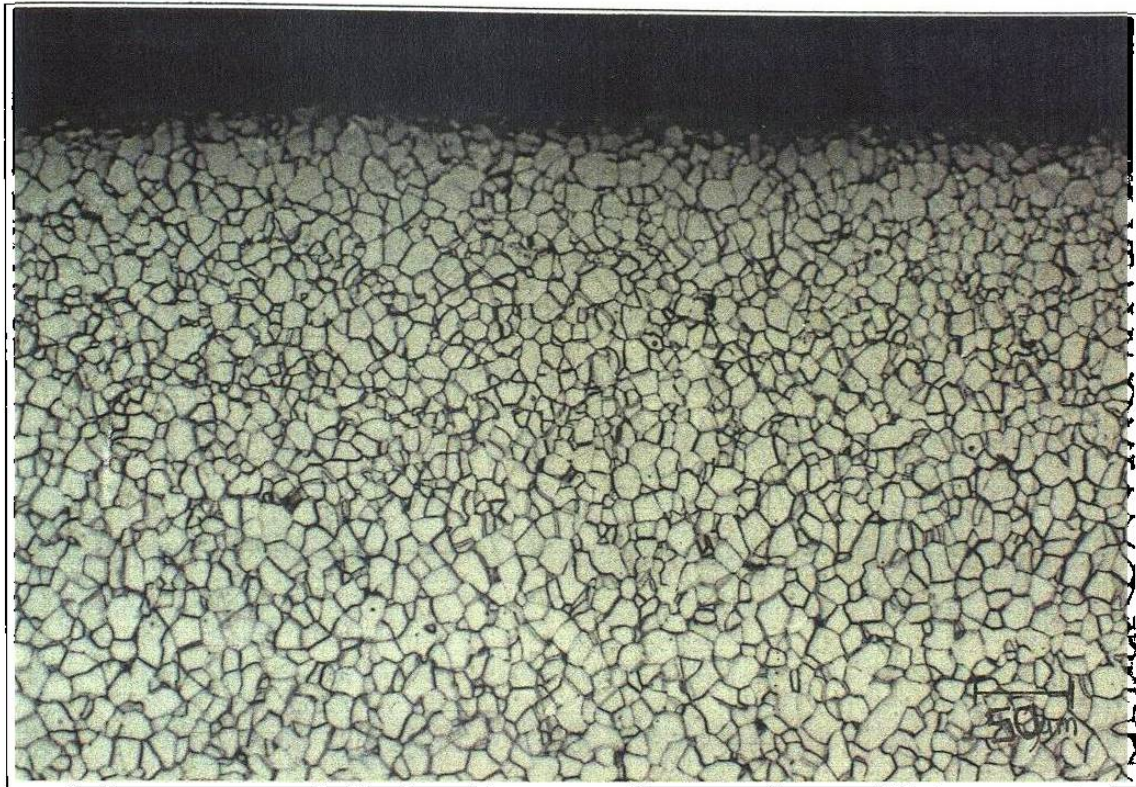
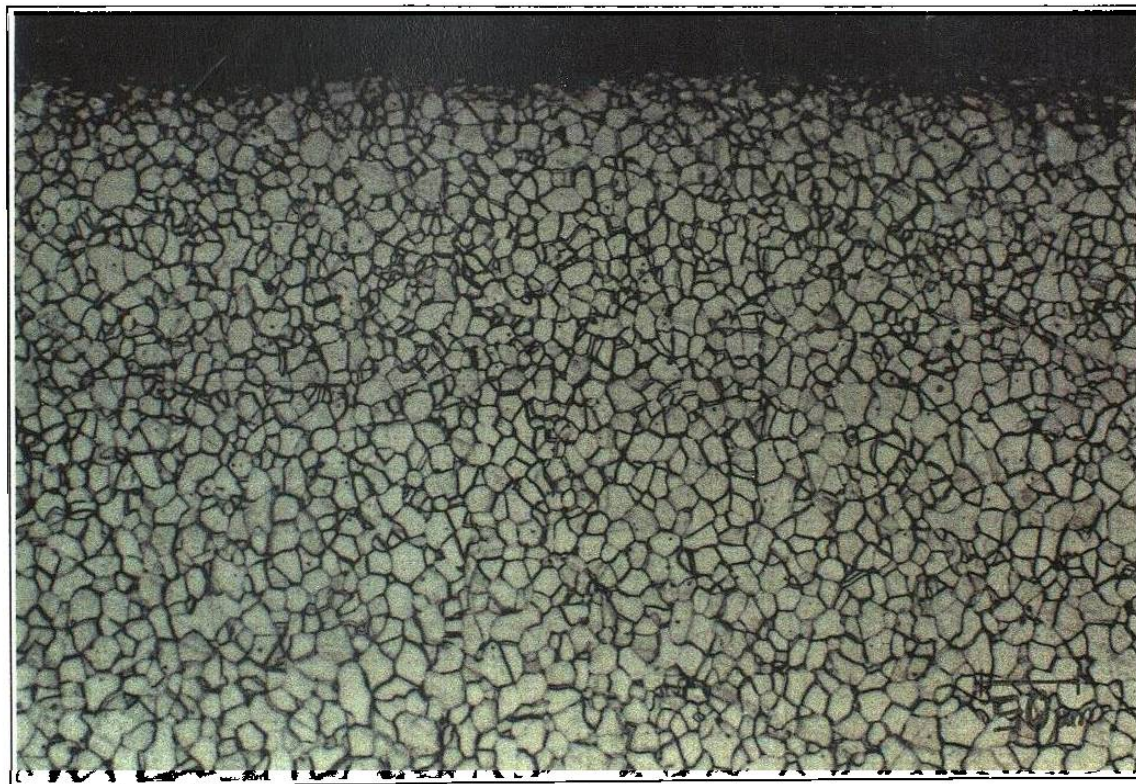


Figura 6.8. AISI 1005 zona inferior desgastada a 400X.



(a)



(b)

Figura 6.9 (a) Acero AISI 1005 desgastado zona superior. borde interior a 400 x. (b) borde exterior 200x.

### *ACERO INOXIDABLE 304.*

A continuación se describen las micrografías (figuras 6.10, 6.11, 6.12, 6.13) obtenidas del acero inoxidable 304 antes y después de someterlo a prueba. Las muestras del acero inoxidable presentan una matriz austenítica con una distribución uniforme de tamaño de grano promedio de  $58.63 \mu\text{m}$  con una desviación estándar de  $5.7 \mu\text{m}$  (tamaño 2 según la norma ASTM E 112 - 88) según la figura 6.10. Con respecto al testigo (muestra sin desgastar) se observa en la figura 6.11 una capa delgada de deformación plástica en la superficie interior de aproximadamente  $50 \mu\text{m}$ , como en el caso del acero al carbono ésta no se encuentra uniformemente en toda el área analizada, incluso existe mayor región que no tiene daño superficial. En las áreas de mayor desgaste se observan desprendimientos de material como se observa en la figura 6.12. Esto es debido al efecto de los impactos de los sólidos que viajan tangencialmente en la tubería horizontal.

Los granos austeníticos del acero inoxidable 304, presentan una leve zona deformada en la que se puede observar el inicio de la formación de micro grietas como se puede ver en la figura 6.13, la dureza de este material es mayor que los otros aceros lo que representa una mayor resistencia a la deformación que se está llevando a cabo en la sub superficie.

También se analizaron muestras de la zona superior donde se encontró que las áreas de deformación son mínimas y la profundidad de algunas de ellas fue aproximadamente  $10 \mu\text{m}$ . Las figuras 6.14 (a), (b) muestran el daño sufrido en la zona superior del tubo, en ellas se observa claramente que no ha sufrido un daño severo la zona superior incluso se puede llegar a pensar que el daño podría ser nulo. Al igual que el acero AISI 1005 la zona superior estuvo sometida a menor contacto con el flujo de sólidos.

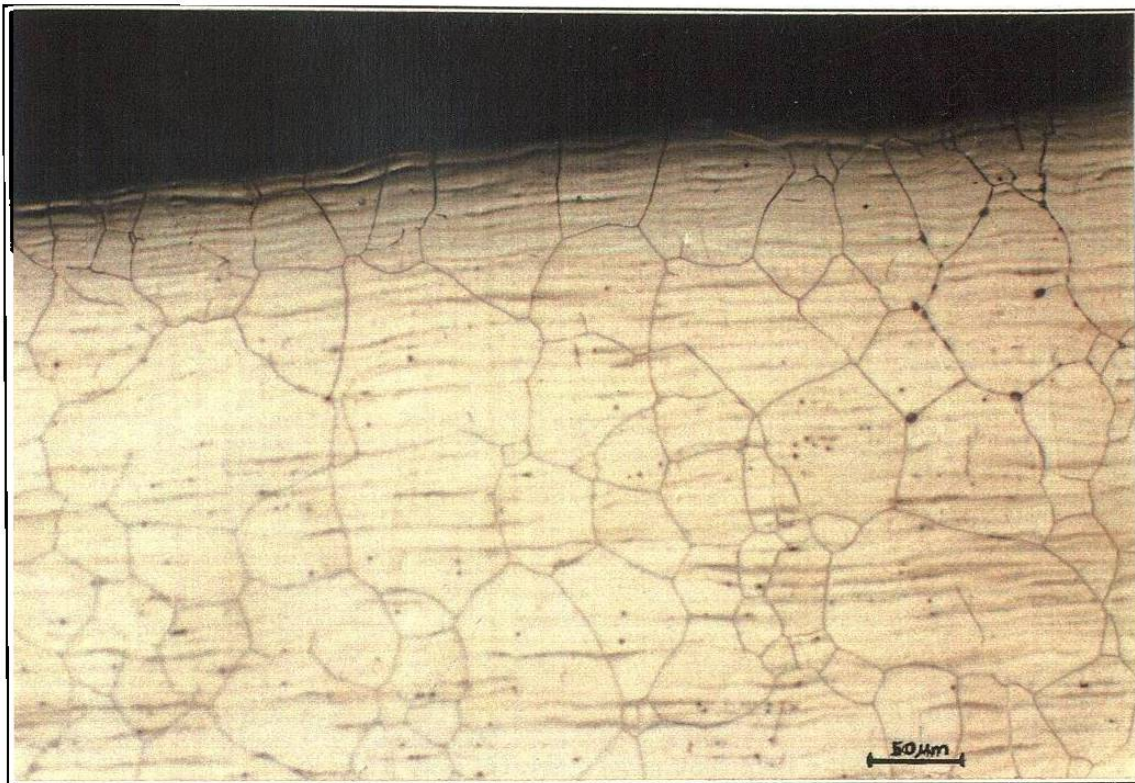


Figura 6.10. Microestructura del Inox. 304 sin desgastar, zona inferior a 200X.

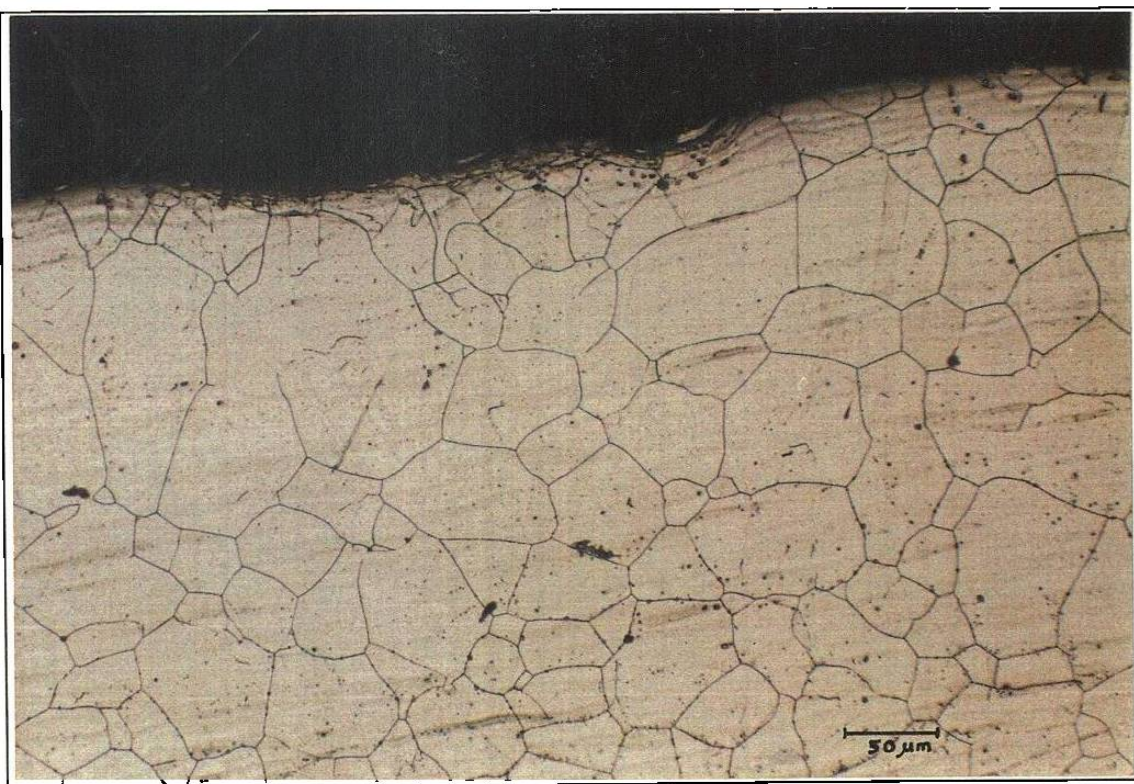
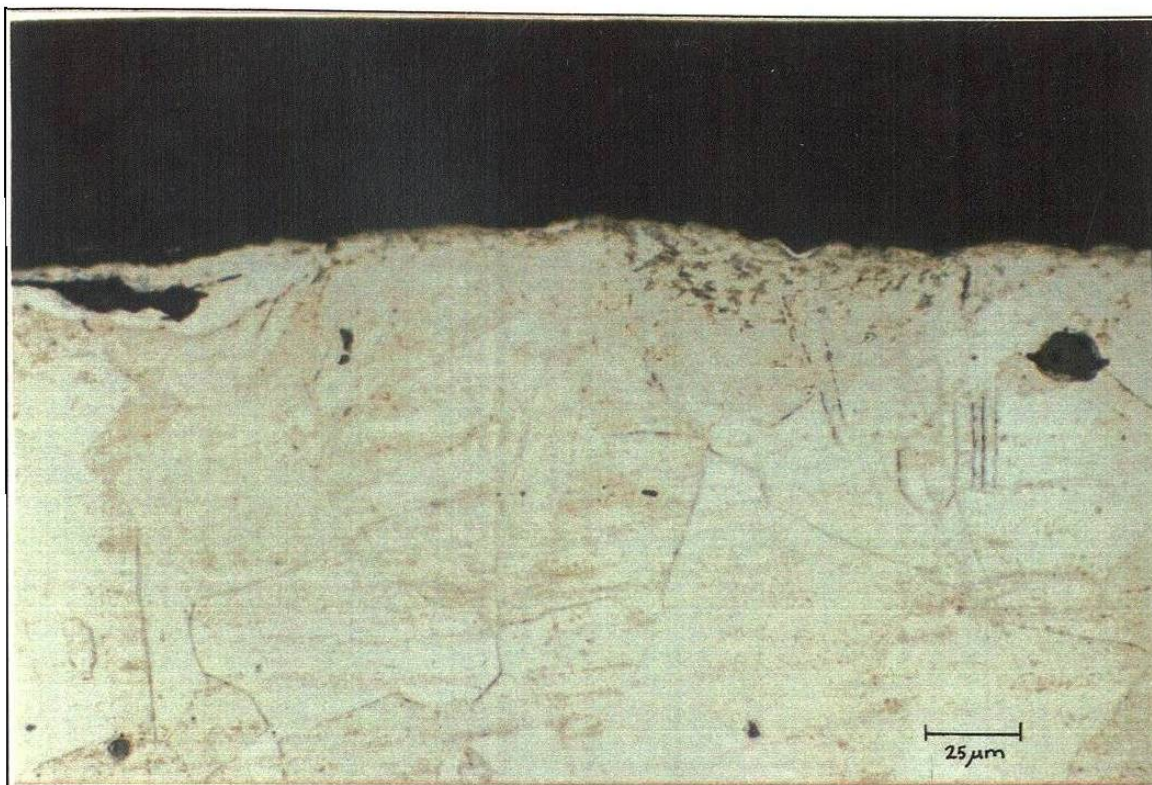


Figura 6.11. Microestructura del Inox. 304 desgastado, zona inferior deformada a 200X .

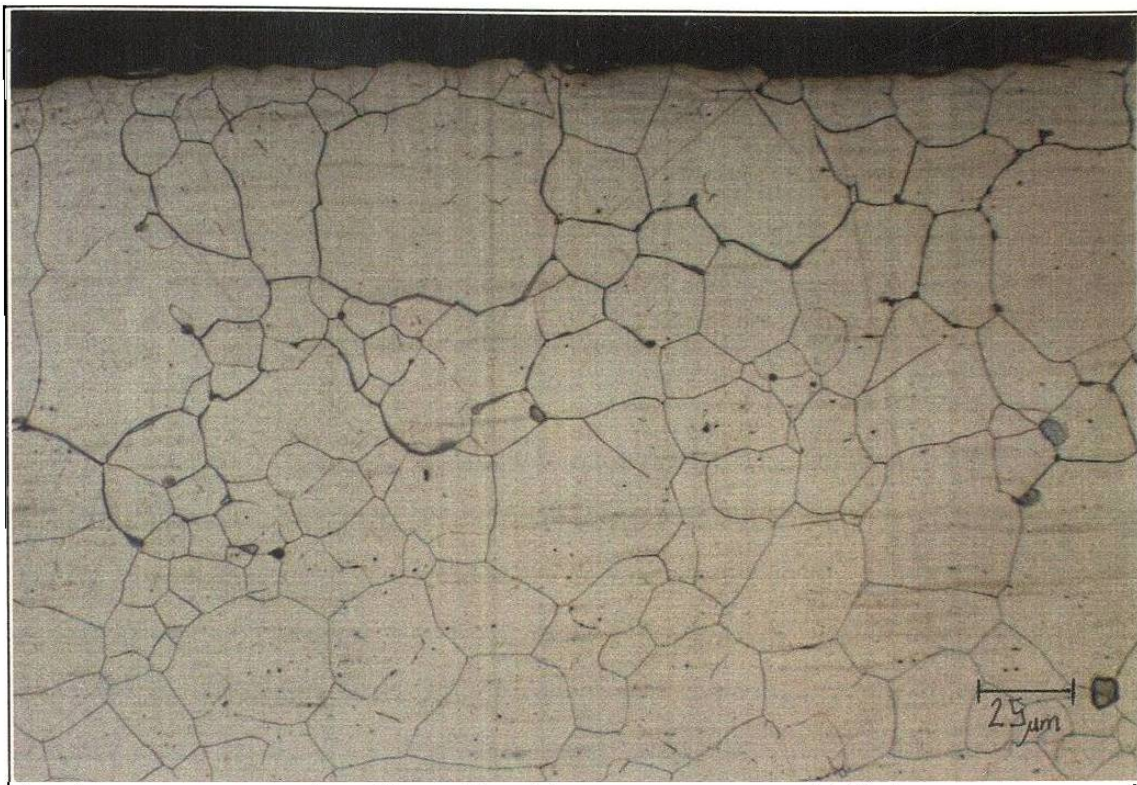




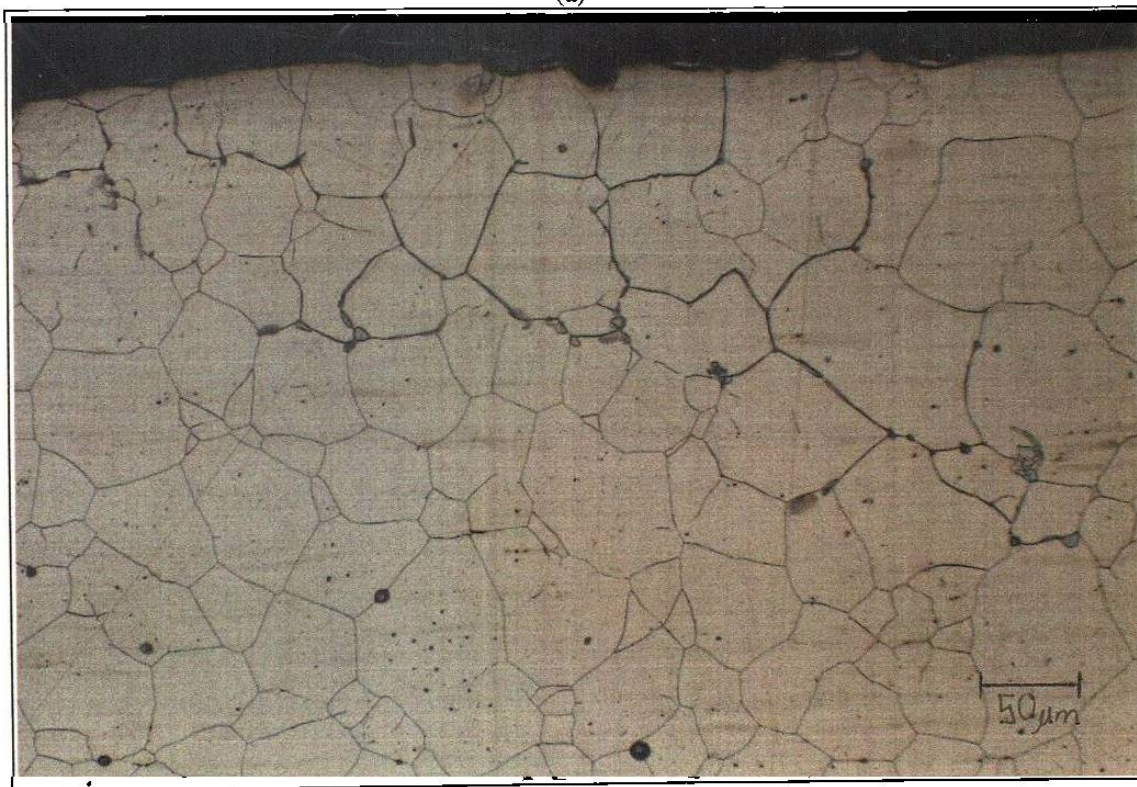
**Figura 6.12. Inox. 304 zona inferior desgastada a 400X.**



**Figura 6.13. Inox. 304 zona inferior desgastada a 400X.**



(a)



(b)

Figura 14 (a) Acero Inoxidable 304. Zona superior, borde interior a 400x. (b) borde interior a 200 x.

### *ACERO AISI A335 TIPO P-11.*

A continuación se describen las micrografías (figuras 6.15, 6.16, 6.17, 6.18) obtenidas del acero tipo P-11 antes y después de someterlo a prueba. Las muestras del acero P-11 presenta una microestructura formada por una matriz de ferrita (áreas claras), con islas de perlita (áreas oscuras) con una distribución uniforme de tamaño de grano promedio de  $15.32 \mu\text{m}$  con una desviación estándar de  $1.8 \mu\text{m}$  (tamaño 5 según la norma ASTM E 112 - 88) ver figura 6.15. El testigo presenta una decarburización de aproximadamente  $200 \mu\text{m}$  en la superficie interna y externa de la pared del tubo debido al proceso de manufactura, lo que implica que la superficie interna de la pared que está en contacto con el material transportado está formado por ferrita. Al obtener la muestra después de la prueba se observa en la figura 6.16 una deformación plástica en la superficie interior de aproximadamente  $41 \mu\text{m}$ , ésta no se encuentra uniformemente en toda el área analizada, como puede observarse en la micrografía. Al igual que los otros aceros se observan en la figura 6.17 desprendimientos de material.

Dado que este tubo presenta una decarburización tenemos una menor resistencia a la penetración de la deformación. Este acero presenta una dureza promedio en la superficie mayor que el acero al carbono, por lo que presentó menor profundidad de la capa deformada. Los granos deformados presentan un alargamiento en lo que es el flujo plástico que se realizó en la zona inferior del tubo como se puede observar en la figura 6.18. El transporte de fase densa del material, donde el ángulo de impacto de los sólidos fue cero o muy pequeño, afecta de una manera grave a esta zona, si la concentración de sólidos o la razón del flujo de sólidos aumenta, el desgaste que se lleve a cabo aumentará considerablemente.

Al igual que los aceros al carbono e inoxidable, las muestras tomadas de la zona superior del tubo del acero A335- P11, como se muestran en las figuras 6.19 (a) y (b), no presentan un daño tan severo como en la zona inferior y, comparándola con la deformación plástica sufrida en esa zona, se puede estimar que es de aproximadamente  $20 \mu\text{m}$ , lo que se comprueba en las lecturas de espesores.

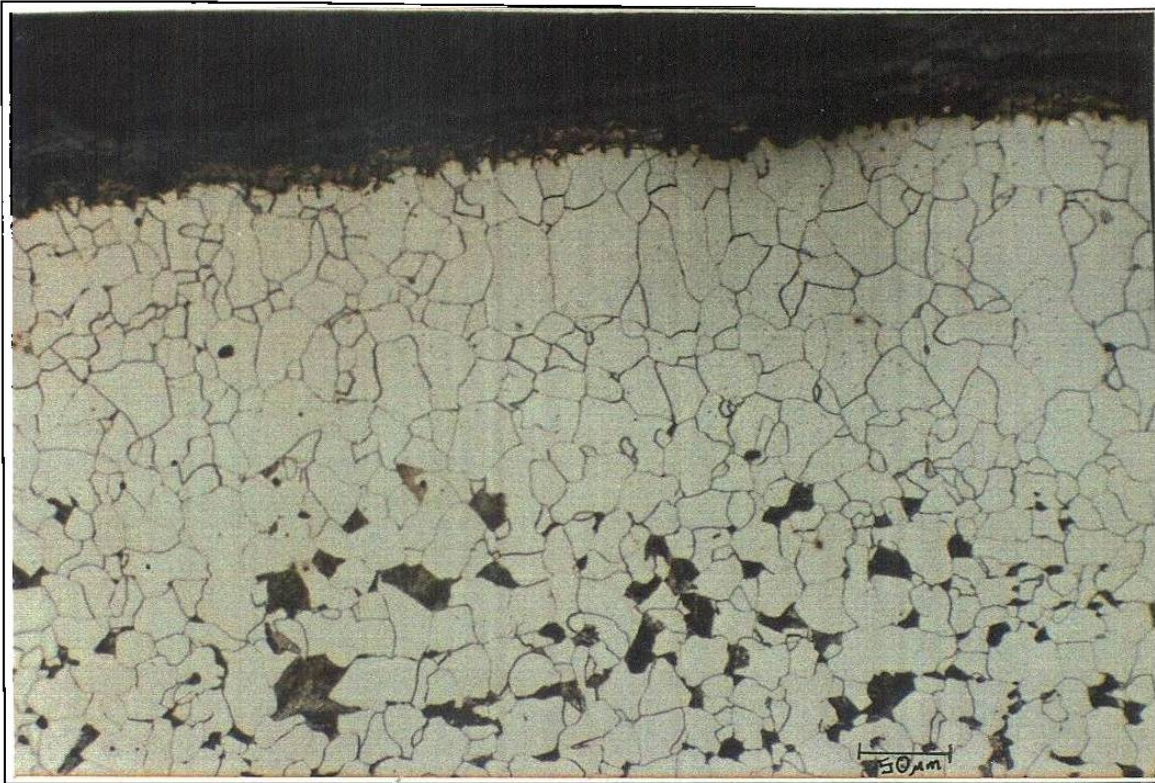


Figura 6.15. Microestructura del P-11 sin desgastar, zona inferior a 200X.

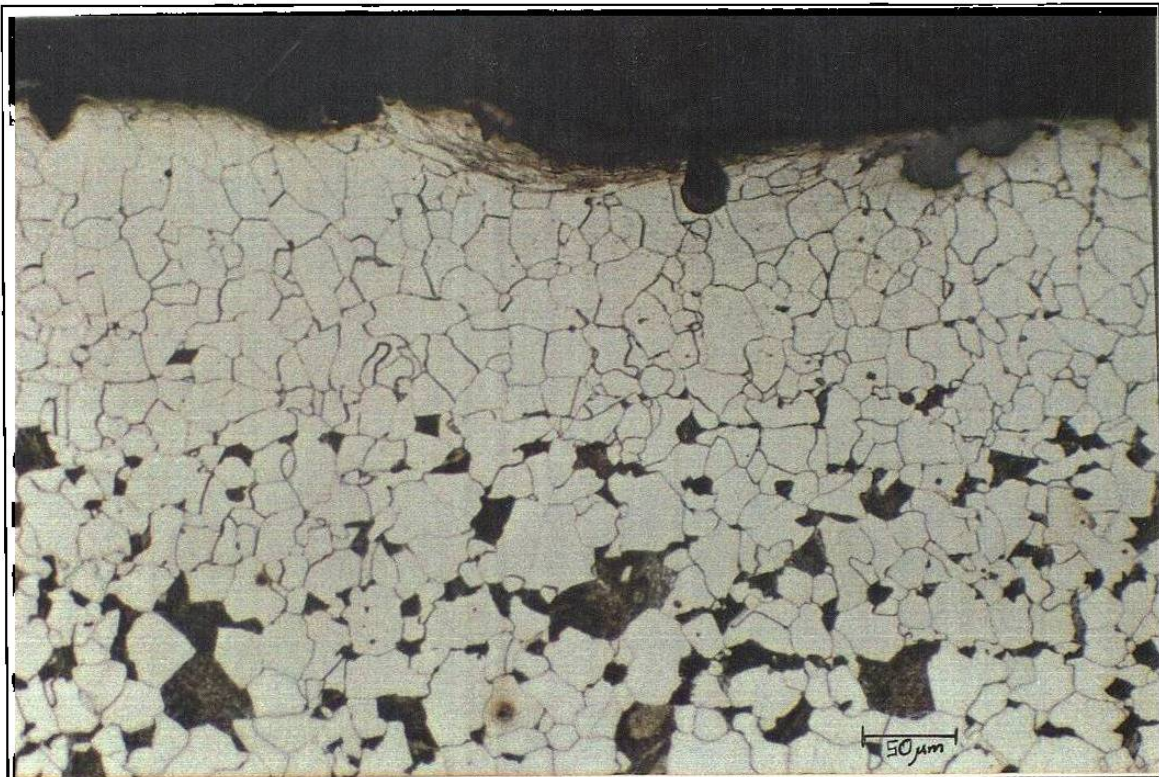


Figura 6.16. Microestructura del P-11 desgastado, zona inferior deformada a 200X .

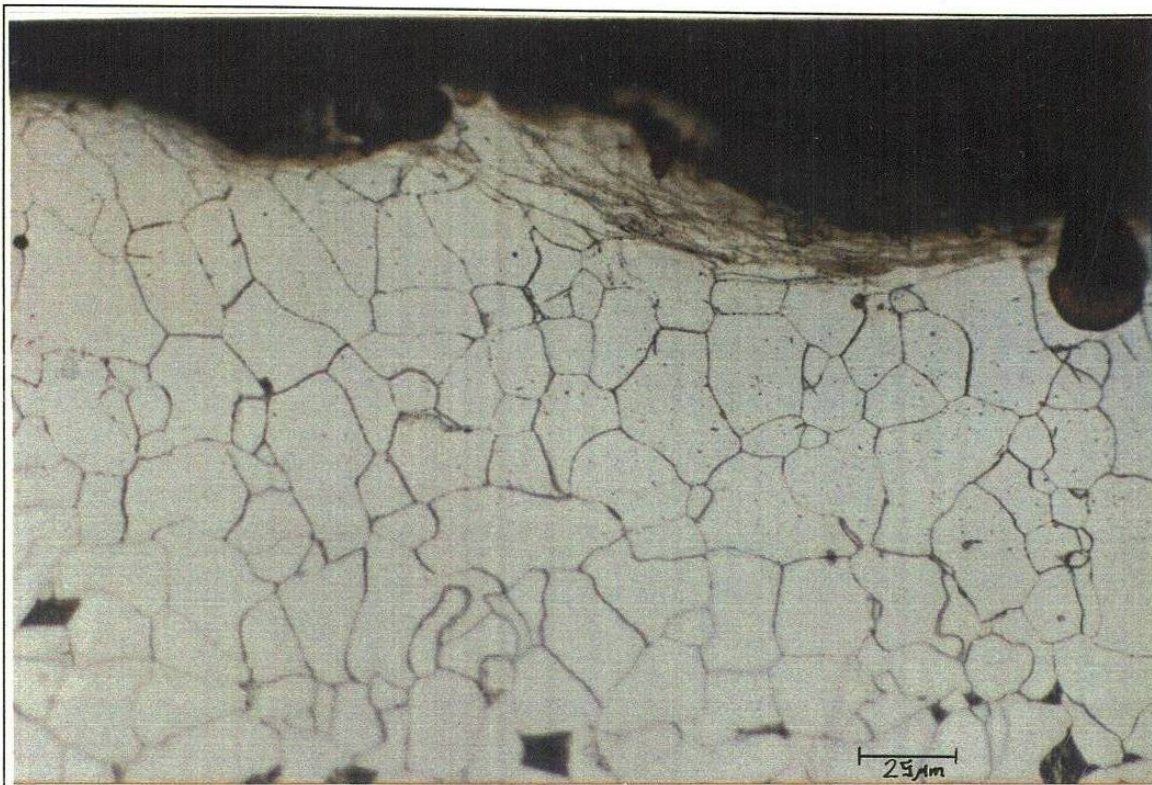


Figura 6.17: Acero P-11 zona inferior desgastada a 400X.

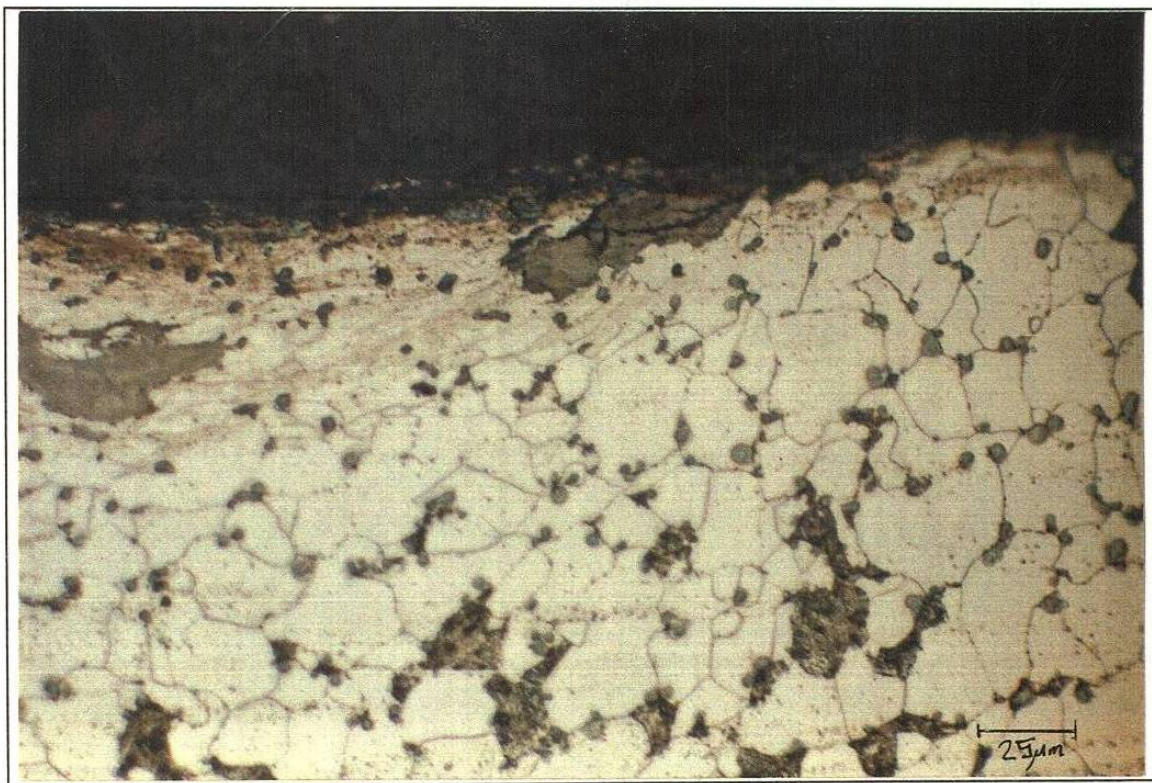


Figura 6.18: Acero P-11 zona inferior desgastada a 400X.



(a)



(b)

Figura 19 (a) Acero P-11 Desgastado. Zona superior, borde interior a 200x. (b) borde interior a 200 x.

## 6.4 MICRODUREZAS

### *ACERO AL CARBONO.*

Recopilando los datos del ensayo de microdureza antes y después de la prueba y elaborando un tratamiento estadístico, se dan a continuación el comportamiento de los datos en función de la profundidad de la superficie inferior al interior de la pared del tubo. En las gráficas de las figuras 6.20 y 6.21 se observa un endurecimiento en la sub superficie debido a la deformación plástica que se llevó a cabo, la profundidad alcanzada es aproximadamente de 66  $\mu\text{m}$  y se aprecia un reblandecimiento del material base del acero AISI 1005 una dureza promedio inicial de 202 HV a una dureza promedio de 177 HV. Este reblandecimiento se debe a un recocido parcial, el cual conduce a una recuperación del acero al carbono que es sometido durante un intervalo de tiempo a una temperatura de 323 °C. Durante la recuperación, la resistencia del acero trabajado se reduce sólo ligeramente, pero su ductilidad generalmente aumenta [24]. Se obtuvo la desviación estándar de la media de todos los datos de microdurezas para conseguir el intervalo de confianza como se describe en la tabla 6.4.1.

Tabla 6.4.1 Valores promedios de microdureza Vickers en la zona inferior del acero al carbono en la zona no deformada.

	INICIAL	FINAL
$X + 2\sigma$	229	201
$X$	202	177
$X - 2\sigma$	175	153

En la figura 6.21 se observa el comportamiento de las microdurezas del acero AISI 1005 desgastado. El comportamiento observado de la gráfica sigue la forma de una función de potencia que se puede expresar de la siguiente forma:

$$D(\text{HV}) = 585.51 x^{-0.23}$$

donde: D = microdureza del material y x = a la profundidad de indentación.

Tal relación nos da una idea del endurecimiento que se lleva a cabo en el proceso de transporte de material en fase densa.

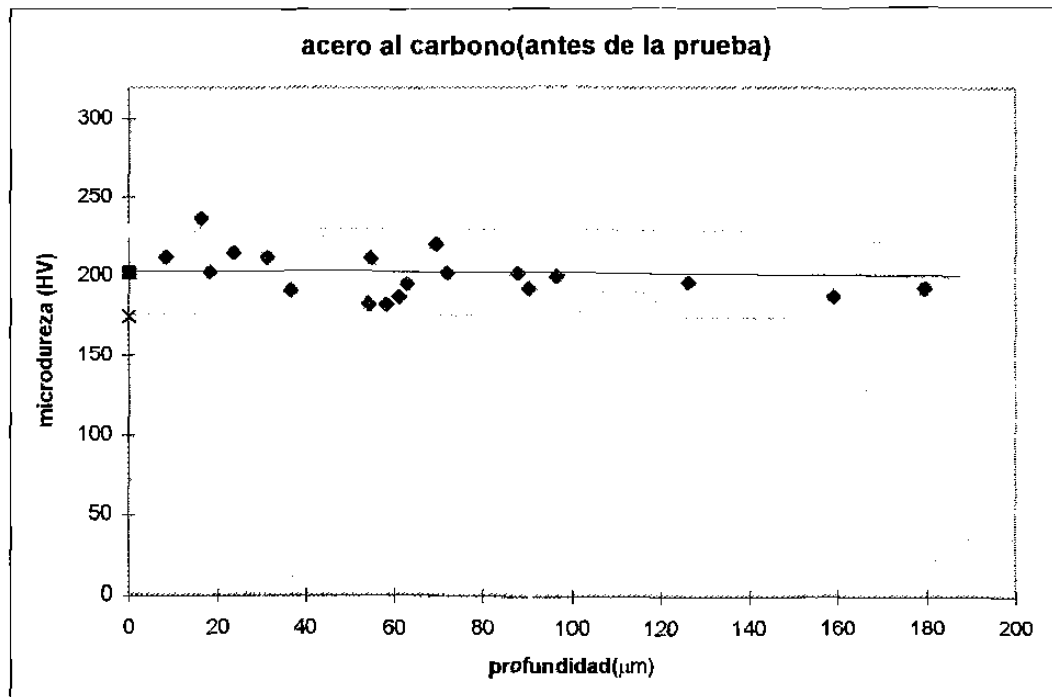


Figura 6.20 Gráfica de microdureza inicial del acero al carbono.

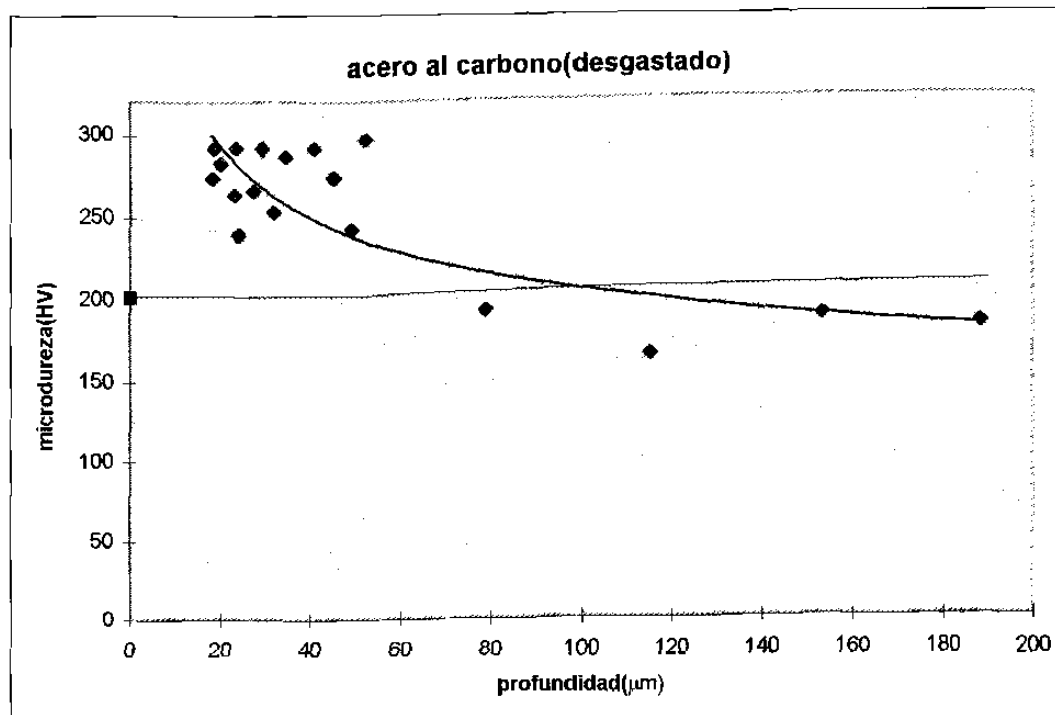


Figura 6.21 Gráfica de microdureza final de la superficie interna deformada.



*ACERO INOXIDABLE 304.*

De la información obtenida de los datos de los ensayos de microdurezas antes y después de la prueba y elaborando un tratamiento estadístico, se dan a continuación el comportamiento de los datos contra la profundidad de la superficie inferior al interior de la pared del tubo en las gráficas de las figuras 6.22 y 6.23. En ellas se observa un endurecimiento debido a la deformación plástica que se llevo a cabo, en la zona deformada que es aproximadamente 50  $\mu\text{m}$ . Se obtuvo la desviación estándar de la media de los datos para conseguir el intervalo de confianza en la muestra antes de la prueba, como se describe en la tabla 6.4.2.

Tabla 6.4.2. Valores promedios de microdureza Vickers en la zona interior del acero inoxidable en la zona no deformada

	INICIAL
$X + 2\sigma$	368
$X$	294
$X - 2\sigma$	220

Se encontró que el material base no sufre de ningún grado de reblandecimiento dado que consiste de una estructura de austenítica que presenta resistencia a un recocido de proceso.

Al igual que el acero al carbono, en la figura 6.23 se observa el comportamiento del perfil de microdurezas siguiendo la relación  $D(HV) = 522.74 x^{-0.09}$  para el acero inoxidable austenítico 304.

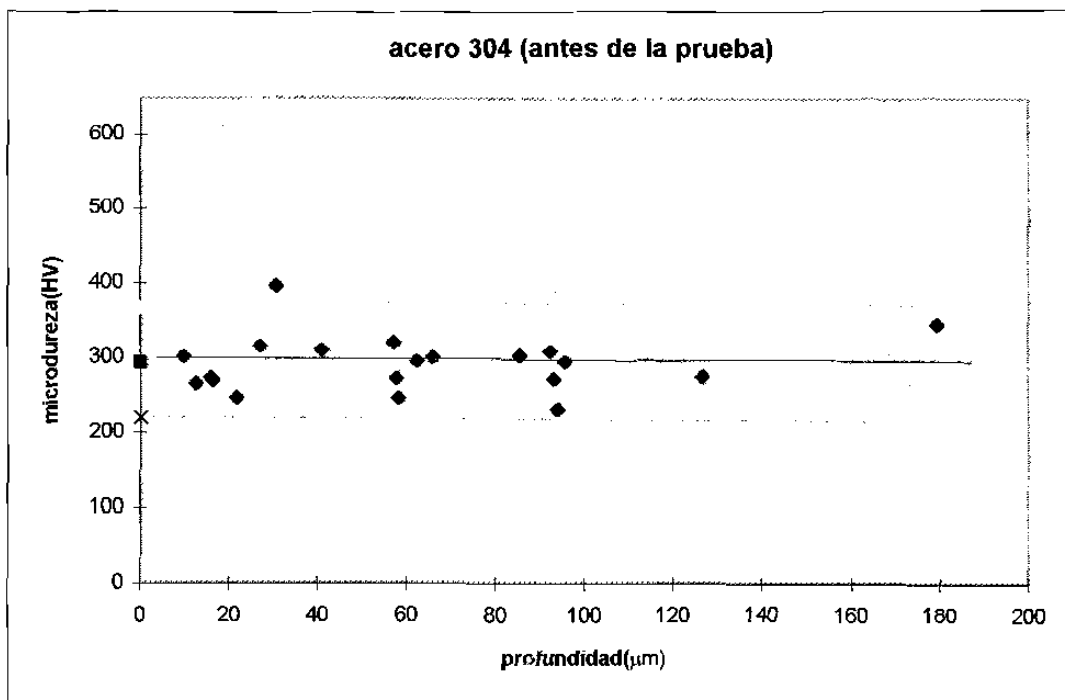


Figura 6.22 Gráfica de microdureza inicial del acero inoxidable 304.

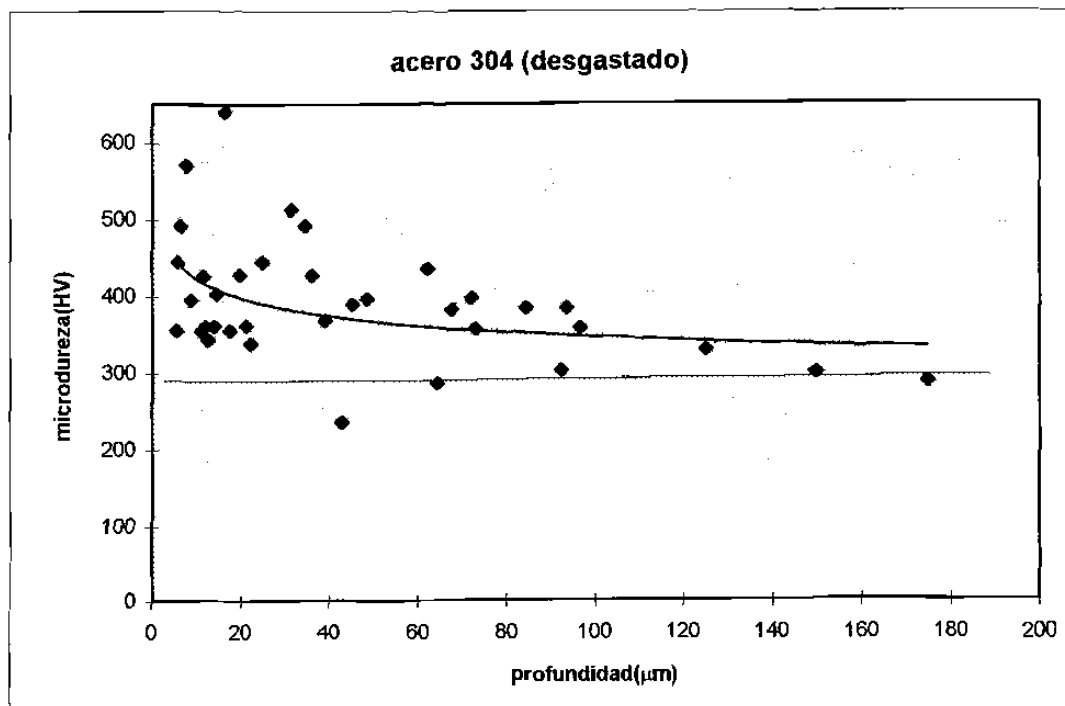


Figura 6.23 Gráfica de microdureza final de la superficie interna deformada del acero 304.

*ACERO TIPO P-11.*

Siguiendo con el mismo procedimiento que los aceros anteriores, se tomaron los datos del ensayo de microdurezas antes y después de la prueba y se elaboró un tratamiento estadístico, se dan a continuación el comportamiento de los datos en las gráficas de las figuras 6.24 y 6.25. En ellas se observa un endurecimiento debido a la deformación plástica que se llevo a cabo, ésta se encuentra aproximadamente a 41  $\mu\text{m}$ . Se obtuvo la desviación estándar de la media de los datos para conseguir el intervalo de confianza como se describe en la tabla 6.4.3. para la muestra antes del ensayo.

Tabla 6.4.3. Valores promedios de microdureza Vickers en la zona interior del acero tipo P-11 en la zona no deformada.

	INICIAL
$X + 2\sigma$	276
$X$	243
$X - 2\sigma$	209

Se encontró que el material base no sufre de ningún grado de reblandecimiento, como puede observarse en la figura 6.25, dado que consiste de una estructura de perlítica que presenta resistencia a un recocido de proceso.

En la figura 25 se observa el comportamiento del perfil de microdurezas, que al igual que los otros aceros sigue la misma función  $D(\text{HV}) = 851.68 x^{-0.22}$ .

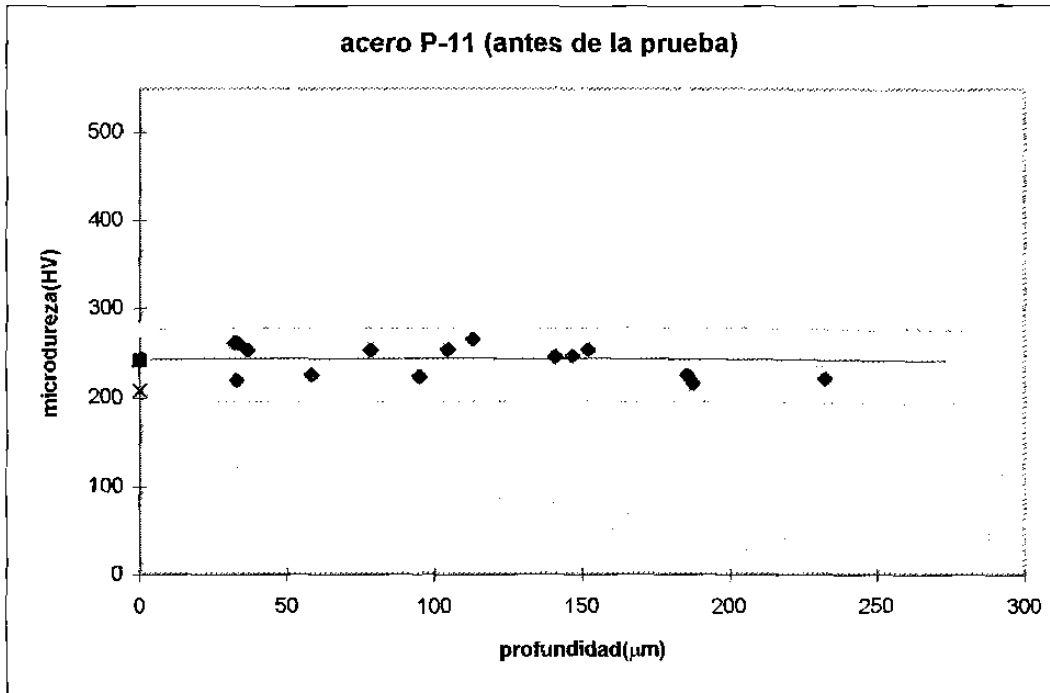


Figura 6.24 Gráfica de microdureza inicial del acero tipo P-11 en la superficie interna.

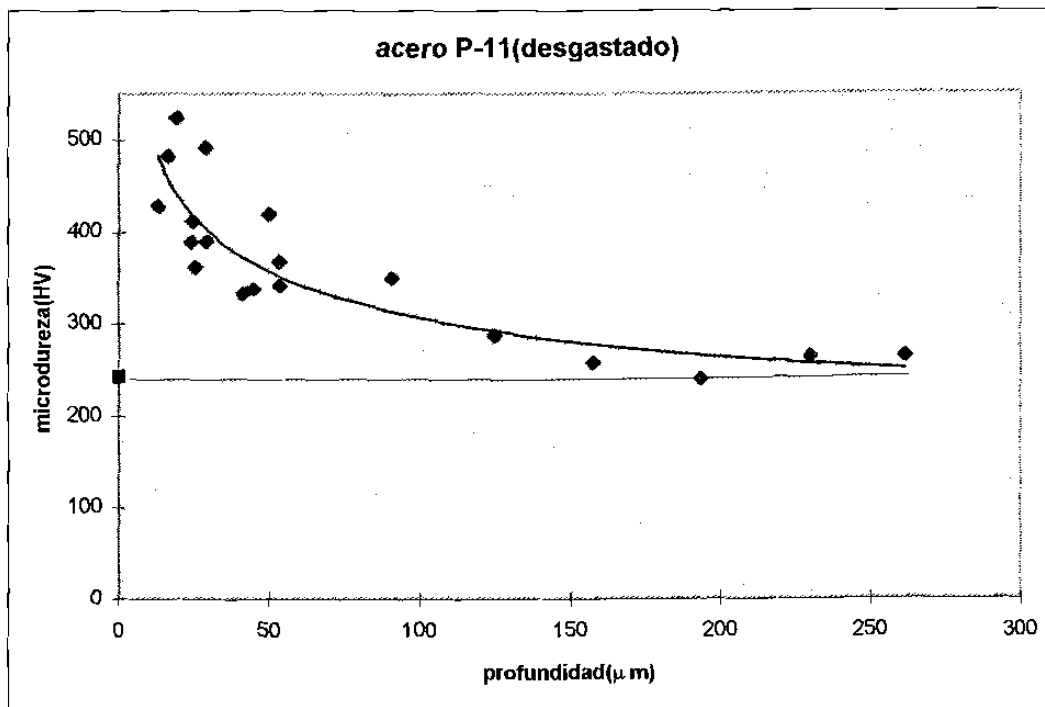


Figura 6.25 Gráfica de microdureza final del acero tipo P-11.

## 6.5 GRÁFICA DE COMPARACIÓN Y PREDICCIÓN DE DESGASTE

En la siguiente figura 6.26 y tabla 6.5.1 se ilustra la comparación cuantitativa de los tres aceros utilizados en la prueba en la sección de mayor desgaste, en ella se observa que el acero más afectado es el acero al carbono, después el acero inoxidable y por último el acero P-11 aunque este acero no lo podemos comparar cuantitativamente con el resto dado que los valores obtenidos no representan lo observado metalográficamente, por lo tanto, no podemos obtener conclusiones con él.

La diferencia del porcentaje de pérdida de espesor del acero al carbono y el acero inoxidable es de un 3% lo que nos indica que no existe una diferencia marcada para estos aceros, por lo que los podemos utilizar en el proceso de transporte neumático a una temperatura de 320 - 350°C. Teniendo en cuenta las ventajas técnicas y económicas.

Tabla 6.5.1. Comparación cuantitativa de los tres tipos de aceros.

MATERIAL	Masa Transportada (tons)	Volumen perdido (cm <sup>3</sup> )	Volumen perdido por tonelada (cm <sup>3</sup> /ton)	Porcentaje de pérdida de espesor
Acero AISI 1005	117	0.557	0.00476	0.026 %
Acero Inoxidable AISI 304	117	0.532	0.00454	0.016 %
Acero A335 Grado P-11	117	0.0365	.00031	0.002 %

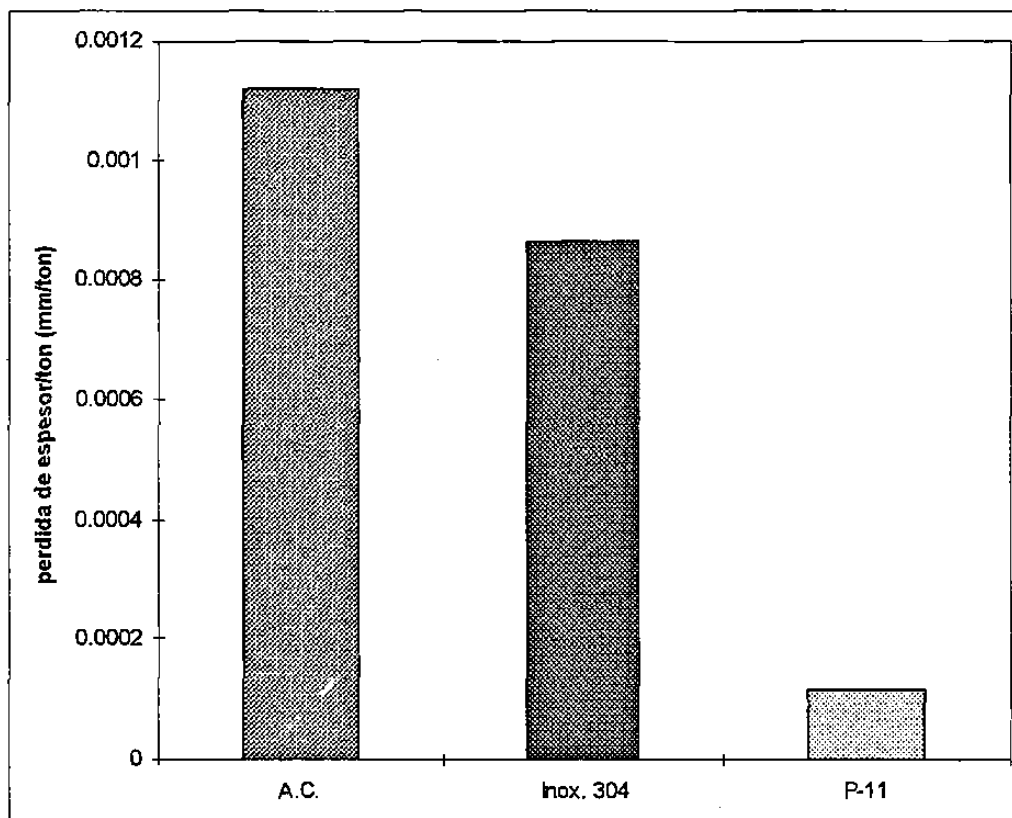


Figura 6.26 Comparación cuantitativa de los tres diferentes aceros en la zona sur.

## PREDICCIÓN DE DESGASTE

Con respecto a este punto, se toma en consideración que el mecanismo de desgaste actuando en mayor grado en el sistema de transporte neumático de fase densa es el de abrasión, por lo tanto, se manejan las expresiones matemáticas encontradas en la literatura [5, 10] relacionadas con los parámetros de operación del proceso y las propiedades del material.

$$W_{ab} = \frac{V}{L} = K \frac{Q}{H} \quad (6)$$

donde:  $W_{ab}$  = el total de volumen removido por unidad de distancia deslizada.

$Q$  = es el total de carga aplicada.

$H$  = la dureza del material.

$K$  = la coeficiente de desgaste.

Las siguientes ecuaciones representan los valores encontrados de las pruebas de este trabajo :

Tabla 6.5.2. Ecuaciones de predicción de desgaste de los tres aceros.

MATERIAL	COEFICIENTE DE DESGASTE <b>K</b>	ECUACIONES DE VOLUMEN DESGASTADO
ACERO AL CARBONO	$1 \times 10^{-3}$	$V_{AC} = [1.53 \times 10^{-8}] * L * ton.$
ACERO INOXIDABLE 304	$1.4 \times 10^{-3}$	$V_{INOX} = [1.42 \times 10^{-8}] * L * ton.$
ACERO A335 GRADO P-11	$3.17 \times 10^{-3}$	$V_{P-11} = [1.89 \times 10^{-8}] * L * ton.$

Los valores de los coeficientes de desgaste encontrados para los tres aceros son aproximados a los datos dados en la literatura [13]. Para los resultados del acero P-11 no se tiene una confiabilidad del 100%, dado que no se tuvo certeza de las mediciones de espesores, pero se observó en las micrografías el daño que sufrió y el endurecimiento que tuvo durante el proceso.

Una vez obtenidas estas ecuaciones, se determinó que podíamos encontrar el valor crítico de material transportado para la resistencia de las paredes de los tubos, según el volumen de material que se desprende del espesor de dichos tubos.

El tiempo de vida estimado para los tubos con estas condiciones de proceso de transporte neumático se obtiene de la siguiente manera:

El área desgastada que se presentó en la zona inferior de los tubos se mostró microscópicamente como una banda de aproximadamente de ancho de 3 cm. A lo largo de los segmentos de los tres diferentes tubos que son de 30 cm de longitud. Simulando el área afectada con la geometría de un rectángulo se encuentra el valor de dicha área que es de 90 cm<sup>3</sup>. Además se utilizó el dato inicial de que se transporta 1 ton/hr.

Desgaste erosivo por deformación plástica:

$$\text{La masa del material removido} = K\rho \frac{mv^2}{2H} \quad (7)$$

- donde  $\rho$  = densidad del material  
 $K$  = factor adimensional  
 $m$  = la masa de partículas transportadas  
 $v$  = la velocidad inicial de las partículas  
 $H$  = dureza del material erosionado

La relación lineal observada en el estudio estacionario de erosión tiene una simple definición  $E$  a ser utilizada:

$$E = \frac{\text{masa de material removido}}{\text{masa de partículas transportadas}} \quad (8)$$

entonces :

$$E = K\rho \frac{mv^2}{2H} \quad (9)$$



La velocidad para fases densas es relativamente baja, entre 2 y 8 m/s, dependiendo de la concentración de sólidos y el diámetro de la tubería [9, 18, 20]. De los datos proporcionados por la empresa HYLISA [2] se sabe que el flujo de pélets en la prueba realizada en este trabajo la velocidad de los pistones es aproximadamente de 2.5 a 3 m/s, por lo que se encuentra muy cercano a la literatura; una vez conocida la variable de la velocidad procedemos a evaluar las ecuaciones anteriores.

Determinando el valor de la erosión de la ecuación (8) relacionada con los datos iniciales y encontrados en la prueba de la siguiente forma:

$$E = \frac{\text{masa removida}}{\text{masa transportada}} \Rightarrow E = \frac{\rho(A_d \cdot h_c)}{m_t} \quad (10)$$

Una vez conocido el valor de la erosión, se obtuvieron los coeficientes K para cada tipo de acero de la ecuación (7), como forma adicional que nos da una razón del comportamiento de los materiales en el mecanismo de desgaste erosivo tangencialmente [13].

Se procedió a determinar la cantidad de masa transportada despejándola de la ecuación (10) para un valor crítico de espesor de la pared del tubo, el cual se considera crítico para la resistencia de los materiales a la presión ejercida en el proceso de transporte neumático. Utilizando el dato inicial de transporte de 117 toneladas transportadas por 15 días encontramos el tiempo de vida estimado para un  $h_c$  igual a 1 mm con la misma proporción.

En la siguiente tabla se dan las predicciones esperadas para los tres tipos de aceros en base al comportamiento observado en este trabajo.

Tabla 6.5.4 Predicción de desgaste para los tres tipos de aceros.

ACEROS	VALOR DE EROSIÓN	COEFICIENTE K	MASA TRANSPORTADA CRÍTICA PARA UNA PERDIDA DE h=1mm.	TIEMPO DE VIDA MEDIA (MESES)
AL CARBONO	$8.02 \times 10^{-8}$	$4.46 \times 10^{-3}$	887 toneladas	3.7
INOX. 304	$6.13 \times 10^{-8}$	$4.97 \times 10^{-3}$	1160 toneladas	4.8
GRADO P-11	$8.26 \times 10^{-9}$	$5.53 \times 10^{-4}$	8610 toneladas	35.6

De los resultados anteriores podemos apreciar que la diferencia en vida estimada entre el acero al carbono y el inoxidable 304 es relativamente pequeña. Los valores de las constantes para cada acero no las podemos comparar entre sí debido a que son de materiales diferentes, si tuvieramos el mismo acero a diferentes condiciones de proceso podríamos evaluar aquellas que presentarían los valores más bajos de desgaste, pero nos dan una idea del daño que están sufriendo ya que estas representan la probabilidad de material desprendido.

Con las ecuaciones anteriores podemos ajustar un modelo básico de desgaste en nuestro sistema asociándolas con parámetro del transporte neumático de la siguiente manera:

Del trabajo de Marcus et al. [20], se sabe que el volumen de sólidos  $V_s$  en un

diferencial de longitud  $dl$  es: 
$$V_s = nV_p = \frac{\dot{G}}{\rho_p c} \cdot dl \text{ y } c = V_g - W_s \quad (11)$$

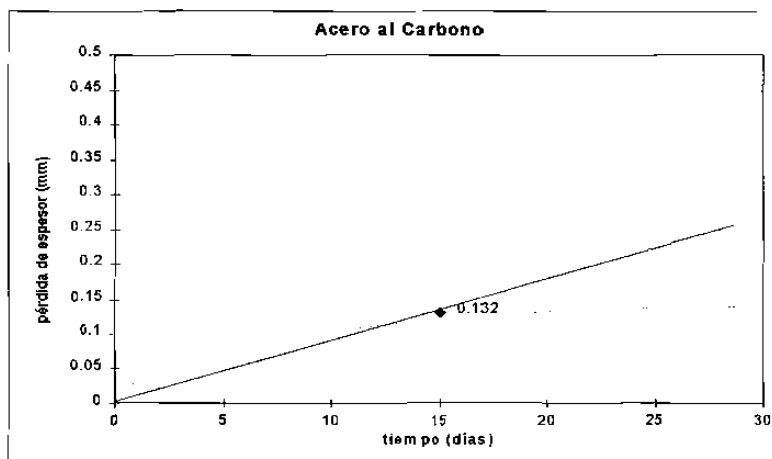
- donde  $V_p$  = volumen de las partículas  
 $\dot{G}$  = razón de flujo de sólidos  
 $\rho_p$  = densidad de las partículas  
 $c$  = velocidad promedio de las partículas  
 $V_g$  = velocidad del gas  
 $W_s$  = velocidad de deslizamiento  
 $n$  = número de partículas

Utilizando estos parámetros en la ecuación (7) tenemos la relación de desgaste de los materiales con los parámetros más importantes de un proceso de transporte neumático. Las ecuaciones (6) y (7) siguen una relación lineal que es una primera aproximación en nuestro trabajo experimental.

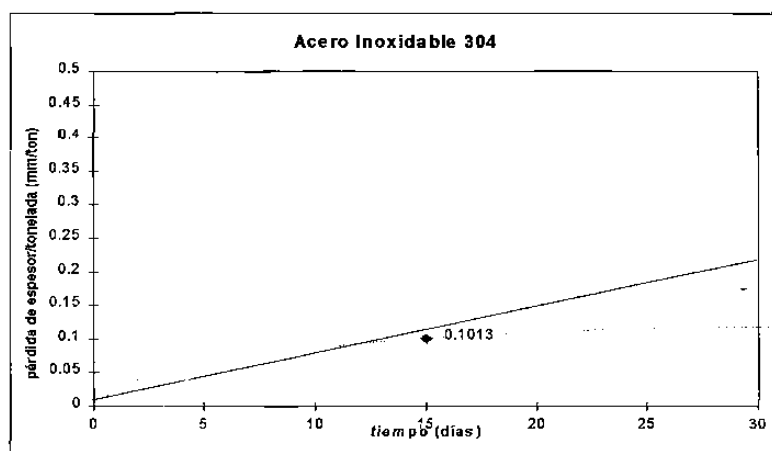
En la figura 6.27 se observan gráficas de los posibles comportamientos de los aceros según las ecuaciones anteriores, donde se gráfica la pérdida de espesor en función del material transportado. Se muestra una recta que pasa por el punto obtenido en este trabajo que proviene de la ecuación (6) y una curva que puede presentarse si la dureza de la superficie del material se incrementa por efecto de la deformación plástica producida en el proceso de transporte de los pélets de hierro esponja. Así que se tiene un posible comportamiento de desgaste entre estas dos curvas según el funcionamiento de las propiedades del material.

Los resultados obtenidos aquí nos conducen a una justificación para futuros trabajos. Claramente una matriz de pruebas es ahora requerida que considere un número de productos diferentes. Los materiales de los tubos y condiciones de flujo se llevan para cuantificar este efecto.

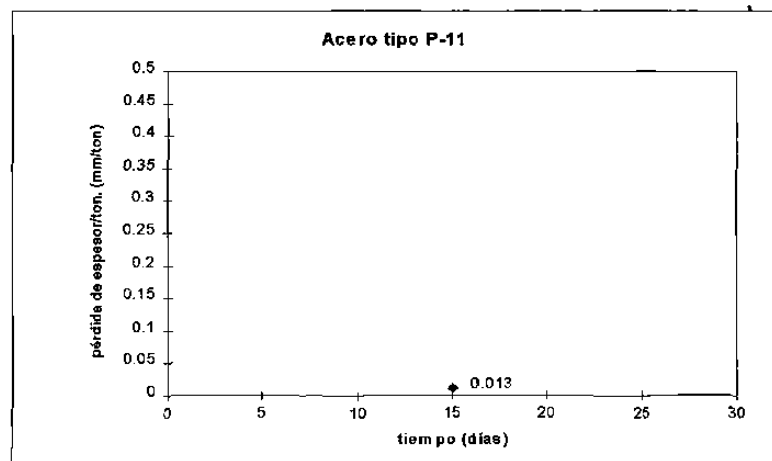
La diferencia en la caída de presión que ocurre en los sistemas de transporte neumático para tubos de diferentes materiales es afectado por sus respectivas rugosidades relativas, en la misma manera que el flujo de fase simple. Sin embargo, el efecto del impacto de las partículas tiene que ser considerado por ser dominante en todo, que la inclinación de suspensión de flujo que aquí no es considerada.



(a)



(b)



(c)

Figura 6.27 (a) Comportamiento del acero al carbono con respecto a la pérdida de espesor en función del tiempo, según las ecuaciones de predicción de desgaste. (b) Comportamiento del acero inoxidable 304. (c) Acero tipo P-11, con el resultado obtenido no se puede realizar una conclusión.