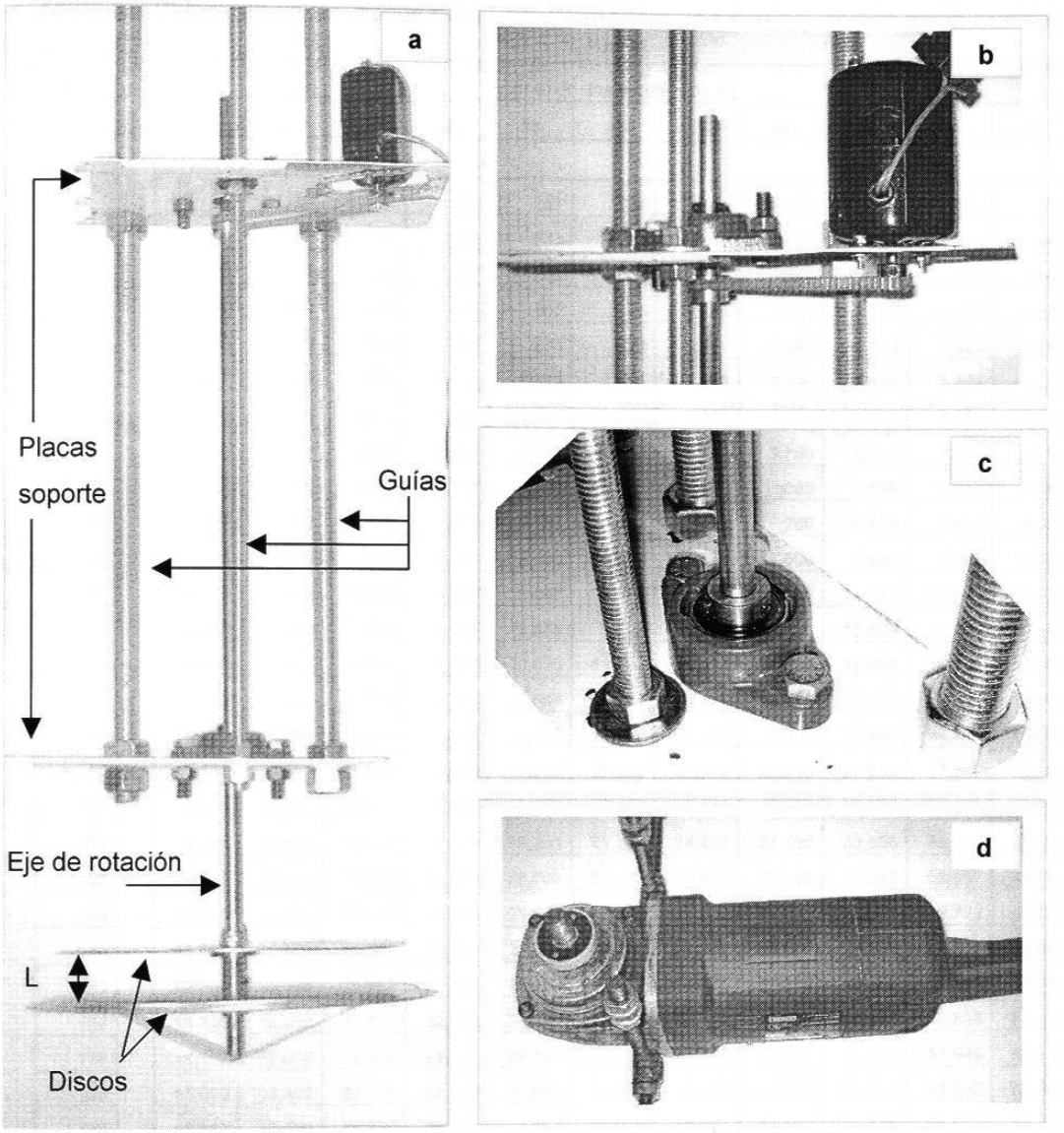


Fig. 8.14 Subsistema velocidad.
(a) Método doble disco, (b) Placa soporte superior, (c) Placa soporte inferior, (d) Ajuste para montaje del motor de 15 amperes.

Los resultados del programa desarrollado para la obtención de velocidad angular del DD son mostrados en la tabla 8.2, bajo la consideración de distancia entre discos de 30 mm, velocidades de partícula en un intervalo entre 1 a 200 $m \cdot s^{-1}$ y ángulos de desfasamiento de huella de 15 a 60º.

Tabla 8.2 Velocidad de los discos para una velocidad de partícula y ángulo entre huellas.

V part.	Ángulo de desfasamiento. (°)										
m·s-1	15	18	20	25	30	35	40	45	50	55	60
1	83	100	111	139	167	194	222	250	278	306	333
2	167	200	222	278	333	389	444	500	556	611	667
3	250	300	333	417	500	583	667	750	833	917	1,000
4	333	400	444	556	667	778	889	1,000	1,111	1,222	1,333
5	417	500	556	694	833	972	1,111	1,250	1,389	1,528	1,667
8	667	800	889	1,111	1,333	1,556	1,778	2,000	2,222	2,444	2,667
10	833	1,000	1,111	1,389	1,667	1,944	2,222	2,500	2,778	3,056	3,333
15	1,250	1,500	1,667	2,083	2,500	2,917	3,333	3,750	4,167	4,583	5,000
20	1,667	2,000	2,222	2,778	3,333	3,889	4,444	5,000	5,556	6,111	6,667
25	2,083	2,500	2,778	3,472	4,167	4,861	5,556	6,250	6,944	7,639	8,333
30	2,500	3,000	3,333	4,167	5,000	5,833	6,667	7,500	8,333	9,167	10,000
40	3,333	4,000	4,444	5,556	6,667	7,778	8,889	10,000	11,111	12,222	13,333
50	4,167	5,000	5,556	6,944	8,333	9,722	11,111	12,500	13,889	15,278	16,667
60	5,000	6,000	6,667	8,333	10,000	11,667	13,333	15,000	16,667	18,333	20,000
70	5,833	7,000	7,778	9,722	11,667	13,611	15,556	17,500	19,444	21,389	23,333
80	6,667	8,000	8,889	11,111	13,333	15,556	17,778	20,000	22,222	24,445	26,667
90	7,500	9,000	10,000	12,500	15,000	17,500	20,000	22,500	25,000	27,500	30,000
100	8,333	10,000	11,111	13,889	16,667	19,444	22,222	25,000	27,778	30,556	33,333
110	9,167	11,000	12,222	15,278	18,333	21,389	24,445	27,500	30,556	33,611	36,667
120	10,000	12,000	13,333	16,667	20,000	23,333	26,667	30,000	33,333	36,667	40,000
130	10,833	13,000	14,444	18,056	21,667	25,278	28,889	32,500	36,111	39,722	43,333
140	11,667	14,000	15,556	19,444	23,333	27,222	31,111	35,000	38,889	42,778	46,667
150	12,500	15,000	16,667	20,833	25,000	29,167	33,333	37,500	41,667	45,833	50,000
160	13,333	16,000	17,778	22,222	26,667	31,111	35,556	40,000	44,445	48,889	53,333
170	14,167	17,000	18,889	23,611	28,333	33,056	37,778	42,500	47,222	51,945	56,667
180	15,000	18,000	20,000	25,000	30,000	35,000	40,000	45,000	50,000	55,000	60,000
190	15,833	19,000	21,111	26,389	31,667	36,945	42,222	47,500	52,778	58,056	63,333
200	16,667	20,000	22,222	27,778	33,333	38,889	44,445	50,000	55,556	61,111	66,667

A partir de los resultados obtenidos en esta tabla, se realizó el análisis para determinar las velocidades angulares del disco que permitirían el paso de las partículas, el cual fue propuesto en la sección 7.4.4.1

Para altas velocidades angulares de los discos se tendría un ángulo de desfasamiento muy grande facilitando su lectura. Pero esto no sucedería si las partículas no alcanzaran a pasar por el orificio, debido al corto tiempo que quedaría expuesto en el chorro de aire-arena. Por otra parte a velocidades angulares muy bajas, las partículas tendrían mayor oportunidad de pasar el

orificio pero los ángulos de desfasamiento serian muy bajos lo que dificultaría la lectura del arco de desfasamiento.

Del análisis elaborado para el espesor del disco y diámetro de orificio (sección 7.4.4.1), para establecer si las partículas con una velocidad de 20 $m \cdot s^{-1}$ de la podrían pasar libremente por el orificio del disco superior fueron obtenidos los siguientes resultados:

Tabla. 8.3 Tiempos de exposición del orificio del disco superior y necesario para el paso de las partículas

Tamaño de partícula (µm)	Velocidad disco R.P.M.	Velocidad Partícula m·s-1	Exposición Disco td (s)	Trayectoria Partícula tp (s)	td-tp (s)	Ángulo entre huellas (°)
425 µm	1667	20	2.1722.E-04	1.2188.E-04	9.5340.E-05	15°
	2000	20	1.8105.E-04	1.2188.E-04	5.9170.E-05	18°
	2222	20	1.6296.E-04	1.2188.E-04	4.1080.E-05	20°
	2778	20	1.3035.E-04	1.2188.E-04	8.4700.E-06	25°
	3333	20	1.0864.E-04	1.2188.E-04	-1.3240.E-05	30°
300 µm	1667	20	2.2315.E-04	1.0938.E-04	1.1377.E-04	15°
	2000	20	1.8600.E-04	1.0938.E-04	7.6620.E-05	18°
	2222	20	1.6742.E-04	1.0938.E-04	5.8040.E-05	20°
	2778	20	1.3391.E-04	1.0938.E-04	2.4530.E-05	25°
	3333	20	1.1116.E-03	1.0938.E-04	1.0022.E-03	30°
212 µm	1667	20	2.2733.E-04	1.0058.E-04	1.2675.E-04	15°
	2000	20	1.8948.E-04	1.0058.E-04	8.8900.E-05	18°
	2222	20	1.7055.E-04	1.0058.E-04	6.9970.E-05	20°
	2778	20	1.3642.E-04	1.0058.E-04	3.5840.E-05	25°
	3333	20	1.1370.E-04	1.0058.E-04	1.3120.E-05	30°
150 µm	1667	20	2.3028.E-04	9.4380.E-05	1.3590.E-04	15°
	2000	20	1.9194.E-04	9.4380.E-05	9.7560.E-05	18°
	2222	20	1.2276.E-04	9.4380.E-05	2.8380.E-05	20°
	2778	20	1.3818.E-04	9.4380.E-05	4.3800.E-05	25°
	3333	20	1.1517.E-04	9.4380.E-05	2.0790.E-05	30°

(td) tiempo de exposición del orificio del disco superior, (tp) tiempo necesario para realizar la trayectoria

Se puede establecer que las velocidades angulares óptimas de los discos para que las partículas puedan pasar e impactar al disco inferior, son aquellas que se encuentran en la tabla 8.2 para huellas de desfasamiento menores a 25°, ya que para la velocidad de giro que propiciará un desfasamiento de huella de 30° no permitiría el paso de las partículas de un tamaño de 425 µm o mayor.

Es importante notar que esta deducción fue a partir del espesor del disco y el diámetro del orificio diseñado, por lo que sí las dimensiones de estas son cambiadas las velocidades angulares requeridas para el paso de las partículas serán diferentes.

El considerar un biselado dará mayor oportunidad al paso de las partículas e incluso las partículas que no pasan por el orificio serán rebotadas hacia fuera del sistema y no desviadas hacia el disco inferior. Sin embargo la vida útil del disco será relativamente baja, ya que el espesor propenso a la erosión será mucho menor. El cambiar el diámetro del orificio del disco a uno mayor tendrá la ventaja de utilizar un mayor ángulo de desfasamiento, pero el diámetro de la huella en el disco inferior será mayor teniendo así dificultad de su lectura.

Para el estudio del comportamiento de las velocidades de giro se utilizó un motor Singer™ a/c con capacidad de 1.2 amperes (figura 8.14 (b)). El sistema arrojo 1500 r.p.m. esto fue principalmente por el amperaje que demandaba el sistema, posteriormente se uso un motor de 6000 r.p.m. ac/dc con 15 amperes donde se obtuvieron velocidades de 9000 rpm para el juego de poleas utilizado.

8.5 Caracterización del sistema de erosión en el H13.

Los resultados obtenidos son presentados de acuerdo al esquema planteado en la sección 7.5.

8.5.1 Resultados de la caracterización de las partículas erosivas.

Distribución de tamaños.

Los resultados de granulometría se muestran en la tabla 8.4 y 8.5 para las pruebas 1 y 2 respectivamente del análisis de la sección 7.5.1. La figura 8.15 muestra la distribución de tamaño de partícula para ambas pruebas.

Tabla.8.4 Resultados de la granulometría en la arena. Prueba 1

Nº de Malla	Tamaño (μm)	Total Acumulado	Retenido por Malla			
			Gramos	%	Factor	Producto
40	425	17.5	17.5	17.5	30	525
50	300	54.0	36.5	36.5	40	1460
70	212	85.6	31.6	31.6	50	1580
100	150	97.3	11.7	11.7	70	819
140	106	99.7	2.4	2.4	100	240
200	75	99.9	0.2	0.2	140	28
270	53	100.0	0.1	0.1	200	20
Fondo		100.0	0.0	0.0	300	0
Total		100.0	100.0	100.0		4672

Nº AFS	47

% Finos	2.7

Tabla.8.5 Resultados de la granulometría en la arena. Prueba 2

Nº de Malla	Tamaño (μm)	Total Acumulado	Retenido por Malla			
			Gramos	%	Factor	Producto
40	425	15.9	15.9	15.9	30	477
50	300	56.1	40.2	40.2	40	1608
70	212	84.4	28.3	28.3	50	1415
100	150	97.7	13.3	13.3	70	931
140	106	99.9	2.2	2.2	100	220
200	75	100.0	0.1	0.1	140	14
270	53	100.0	0.0	0.0	200	0
Fondo		100.0	0.0	0.0	300	0
Total		100.0	100.0	100.0		4665

Nº AFS	47

% Finos	2.3

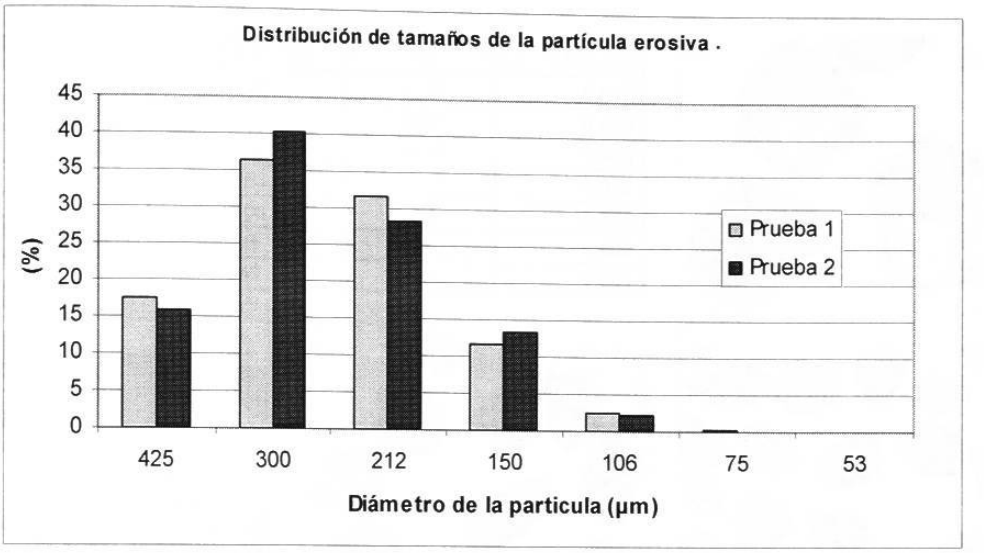


Fig. 8.15 Comparación de los porcentajes encontrados de cada tamaño de partícula en las pruebas granulométrica.

En los resultados de las pruebas de granulometría se observó alrededor del 70% de las partículas analizadas se encuentran en el intervalo de diámetro de 212 y 300 µm. Partículas de tamaños mayores a las 100 µm son consideradas como altamente erosivas [12].

Factor de redondez.

El factor de redondez de las partículas fue determinado a partir de la ecuación 4.1. Los resultados se presentan en la figura 8.16, junto con ejemplos de las morfologías más representativas de los diferentes tamaños de partícula.

Figura	Malla	Tamaño µm	%	F
a	40	425	17.5	0.942
b	50	300	36.5	0.926
c	70	212	31.6	0.906
d	100	150	11.7	0.892
e	140	106	2.4	0.920
f	200	75	0.2	0.885
g	270	53	0.1	0.861

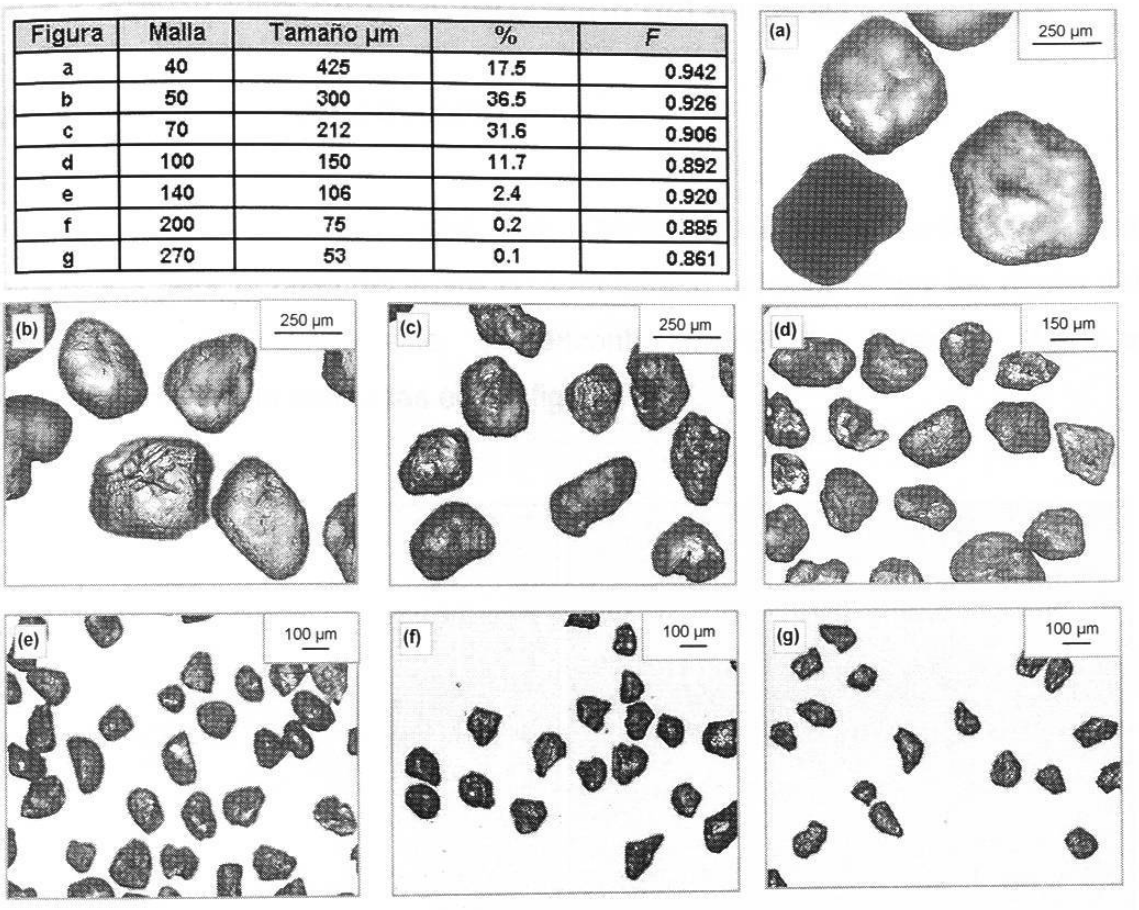


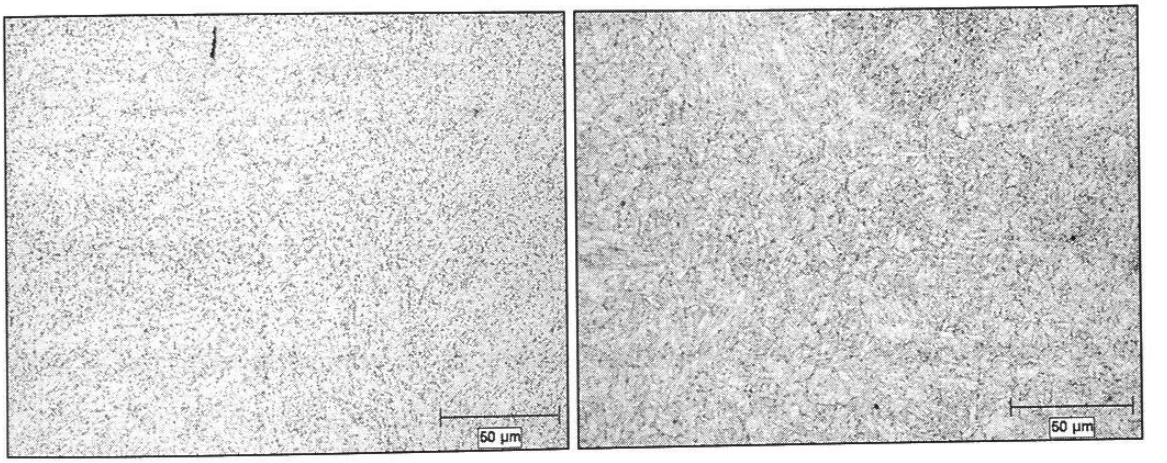
Fig. 8.16 Factor de redondez de la arena utilizada.
La tabla indica el factor de redondez, tamaño y porcentaje de las partículas de arena que forman. Las figuras muestran la forma de las partículas para sus diferentes tamaños.

Se establece que las partículas erosivas con las que fueron llevadas a cabo las pruebas tienen una forma redonda, debido a que sus factores de redondez se encuentran en un intervalo entre 0.86 a 0.94, y de 0.89 a 0.94 para el 97% del total de la arena utilizada.

8.5.2 Resultados de caracterización del material a impactar.

Caracterización microestructural.

Las microestructuras observadas fueron formadas por ferrita con carburos finos dispersos para el caso del acero H13 en estado recocido. Para los casos del acero templado y revenido, se encontró martensita revenida. Algunas micrografías son presentadas en las figuras 8.17.



(1) Acero H-13 En condición de recocido.
Atacado con nital al 2%.
Ferrita con carburos finos dispersos.

(2) Acero H-13 Templada y revenida 40 HRC.
Atacado con nital al 2%
Martensita fina revenida

Fig.8.17 Metalografías en acero grado herramienta H-13

Resultados de las pruebas de microdureza.

Las durezas obtenidas del acero H13 para cada una de las condiciones a ensayar son mostradas en la tabla 8.6. Estas fueron similares a las reportadas por el proveedor de herramentales.

Tabla 8.6 Comparación de durezas reportadas por el proveedor contra durezas obtenidas

Dureza HRC Proveedor	Durezas Obtenidas		
	HV.	HRC.	Promedio HRC
Recocida	215.5	14.5	11.5*
	198.0	10.5	
	193.6	9.5	
30.0	298.7	29.5	29.9
	313.1	31.3	
	293.9	28.9	
40.0	388.3	39.6	39.4
	391.4	39.9	
	378.6	38.6	
55.0	607.9	55.7	55.4
	605.9	55.6	
	596.0	55.0	

*La dureza en un durómetro Rockwell es de 92 HRB (10 HRC).

Análisis químico.

Los resultados obtenidos en el análisis químico (tabla 8.7) estan dentro de los límites de composición reportados en la tabla 2.3 de la designación AISI .

Tabla 8.7 Composición química del acero AISI H13.

	Composición % en Peso									
	AISI	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	V	Co
(1)	H13	0.396	0.48	1.02	5.31	0.14	1.23	<0.01	0.94	0.021
(2)	H13	0.32 - 0.45	0.20 - 0.50	0.80 - 1.20	4.75 - 5.50	0.30 max	1.10 - 1.75	. . .	0.80 - 1.20	. . .

(1) resultados obtenidos en la muestra, (2) composición según AISI [2].

Rugosidad.

Se obtuvieron las cuatro mediciones de rugosidad de cada probeta encontrándose muy similares en su valor de Rq, los resultados se muestran en la tabla 8.8. Los resultados obtenidos demuestran que las superficies fueron

preparadas con una rugosidad por debajo de 1 μm, cumpliendo así con la norma ASTM G76 [37].

Tabla 8.8. Valores de rugosidad de las superficies del acero H13 a impactar.

Probeta lectura.	Valor Rq
R-20º-1-I	0.12
R-40º-1-I	0.21
R-75º-1-I	0.24
R-90º-1-I	0.56
30 HRC 20º-1-I	0.56
30 HRC 40º-1-I	0.25
30 HRC 75º-1-I	0.45
30 HRC 90º-1-I	0.26
40 HRC 20º-1-I	0.27
40 HRC 40º-1-I	0.19
40 HRC 75º-1-I	0.47
40 HRC 90º-1-I	0.40
55 HRC 20º-1-I	0.96
55 HRC 40º-1-I	0.69
55 HRC 75º-1-I	0.58
55 HRC 90º-1-I	0.68

8.5.3 Resultado de la evaluación de las condiciones de impacto.

Pruebas de alimentación de la partícula.

Los resultados de la alimentación de la partícula fueron similares en ambas pruebas. La figura 8.18 muestra los resultados para la prueba de 1950 g.

Se observa que la alimentación de las partículas de arena se mantuvo casi constante a lo largo de la prueba (148.69 $g \cdot min^{-1}$ promedio, 2.478 $g \cdot s^{-1}$), y una desviación estándar poblacional $\sigma = 2.5679$.

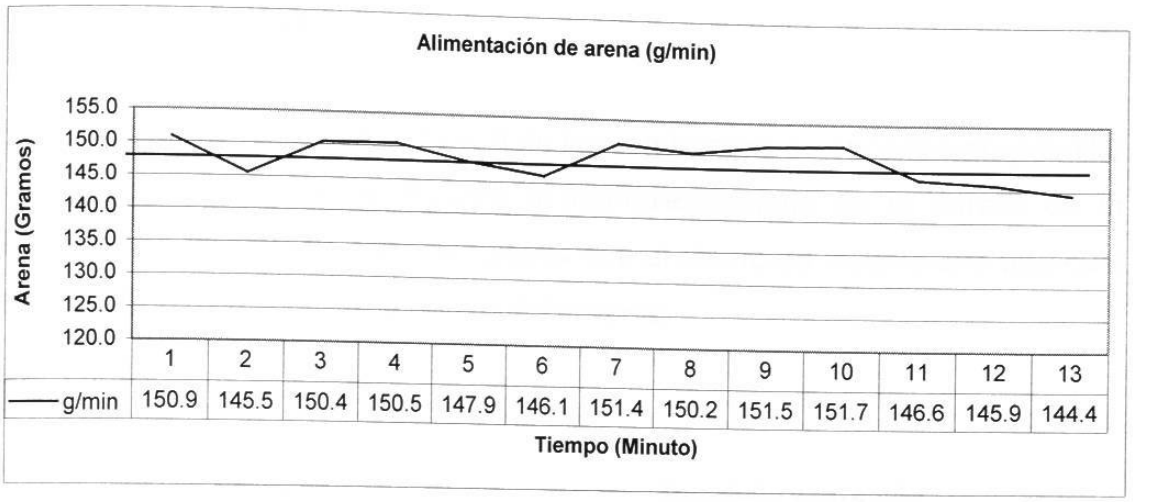


Fig. 8.18 Alimentación de la partícula.
Prueba realizada para descarga de 1950 g de arena sílica .

8.5.4 Resultados del desgaste erosivo en el acero grado herramienta H13.

La comparación de las masas iniciales y finales así como su diferencia y los valores de erosión para cada una de las probetas se presentan en la tabla 8.9.

Tabla 8.9 Resultados de perdida en masa en acero H13.

Código Probeta	Condición	Ángulo Impacto (°)	Peso inicial (pi)	Preso final (pf)	Pérdida (pi-pf)	Erosión (g/g)
1.-R0	recocida	90	195.6288	195.4717	0.1571	1.571E-04
1.-30	30	90	191.5801	191.4447	0.1354	1.354E-04
1.-40	40	90	192.3626	192.2095	0.1531	1.531E-04
1.-55	55	90	193.2907	193.0371	0.2536	2.536E-04
2.-R0	recocida	75	195.9960	195.8326	0.1634	1.634E-04
2.-30	30	75	194.5540	194.3802	0.1738	1.738E-04
2.-40	40	75	191.0706	190.8496	0.2210	2.210E-04
2.-55	55	75	193.4587	193.1628	0.2959	2.959E-04
3.-R0	recocida	40	193.9188	193.6120	0.3068	3.068E-04
3.-30	30	40	193.6205	193.3175	0.3030	3.030E-04
3.-40	40	40	192.8880	192.5660	0.3220	3.220E-04
3.-55	55	40	192.5915	192.2303	0.3612	3.612E-04
4.-R0	recocida	20	192.4814	192.2006	0.2808	2.808E-04
4.-30	30	20	195.2237	194.9388	0.2849	2.849E-04
4.-40	40	20	188.4097	188.1369	0.2728	2.728E-04
4.-55	55	20	192.4390	192.1923	0.2467	2.467E-04

Los resultados de erosión (g/g) de acuerdo a la ecuación 4.7.

Probetas erosionadas.

El área de las huellas para cada una de las condiciones se encontró muy similar para el mismo ángulo de impacto, independientemente de la dureza de la muestra, ver figura 8.19. Esto demuestra que el chorro de mezcla aire-partícula fue una condición controlada dentro del sistema.

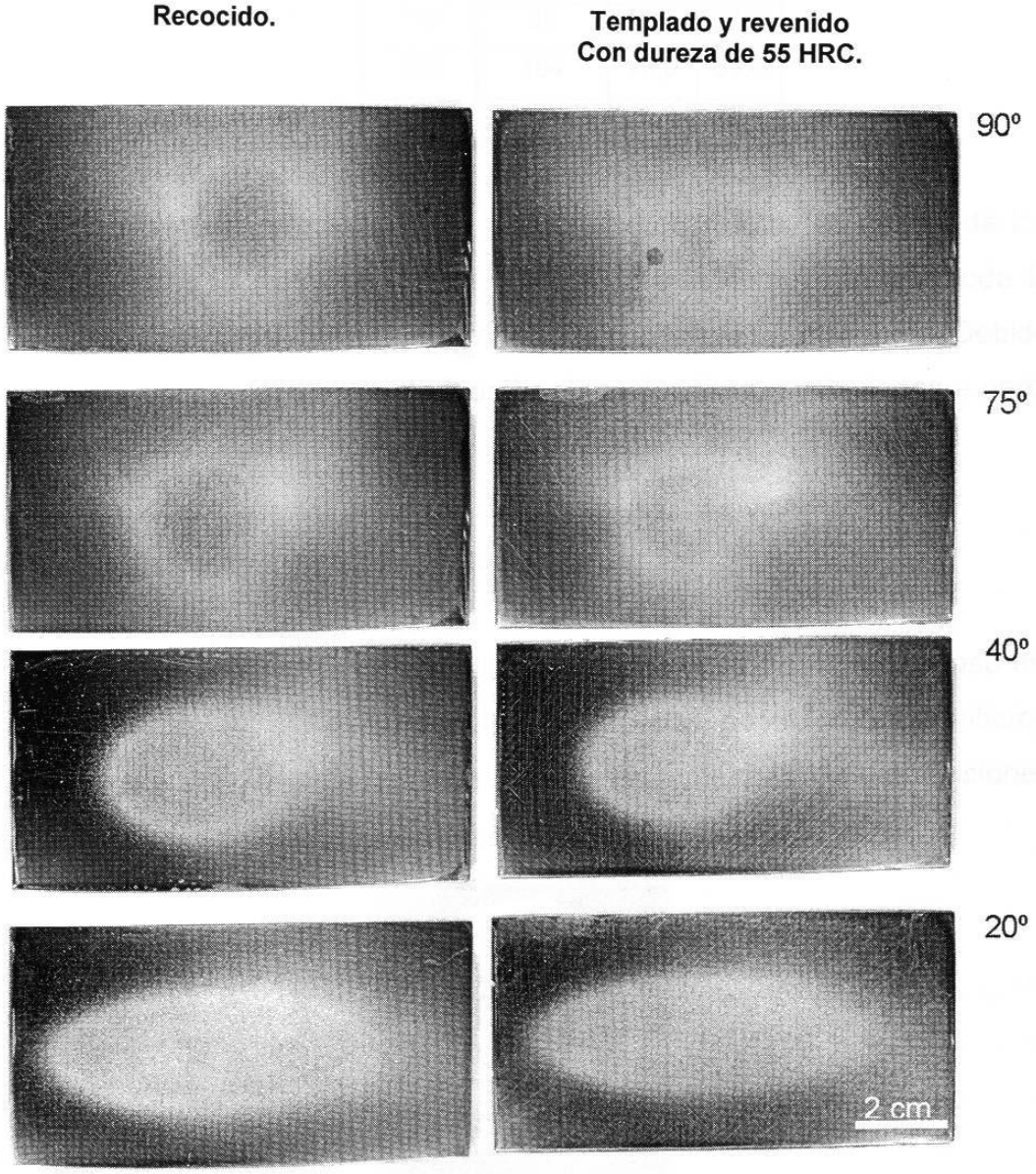


Fig. 8.19 Huellas de erosión en acero H-13.
La dirección de impacto fue de izquierda a derecha a excepción del ángulo de 90°

Se obtuvieron las dimensiones de las huellas ocasionadas por el impacto de partículas en las superficies, tabla 8.10 :

Tabla 8.10. Valores cuantitativos de las huellas acero H-13 recocido.

Ángulo de impacto	Área (mm^2)	Perímetro (mm)	Diámetros (mm) x	y
90	707	94	30,0	30,0
75	712	95	28,4	31,7
40	798	104	25,9	39,0
20	1329	156	25,0	69,0

Las huellas obtenidas producto de la erosión fueron realizadas dentro de los limites que marco la dimensión de la probeta, lo que demuestra que toda la masa de partículas erosivas utilizada impactó la superficie de la probeta. Debido a esta consideración los valores de erosión obtenidos fueron calculados a partir de la ecuación 4.7.

Estudio del diámetro interno de boquilla.

El incremento en el diámetro de boquilla durante los ensayos no sobrepasó del 7 % (figura 8.20) de su dimensión inicial. Pruebas posteriores permitieron determinar una vida útil de boquilla de 25 ensayos bajo las condiciones operativas en las que se realizaron estas pruebas.

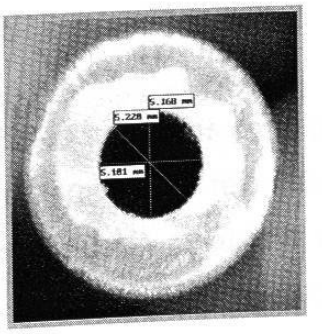


Fig 8.20. Inspección del diámetro de la boquilla.

Gráficos de erosión.

El desgaste erosivo obtenido, es graficado en las figuras 8.21 y 8.22, con respecto al ángulo de impacto y con respecto a la dureza del acero respectivamente.

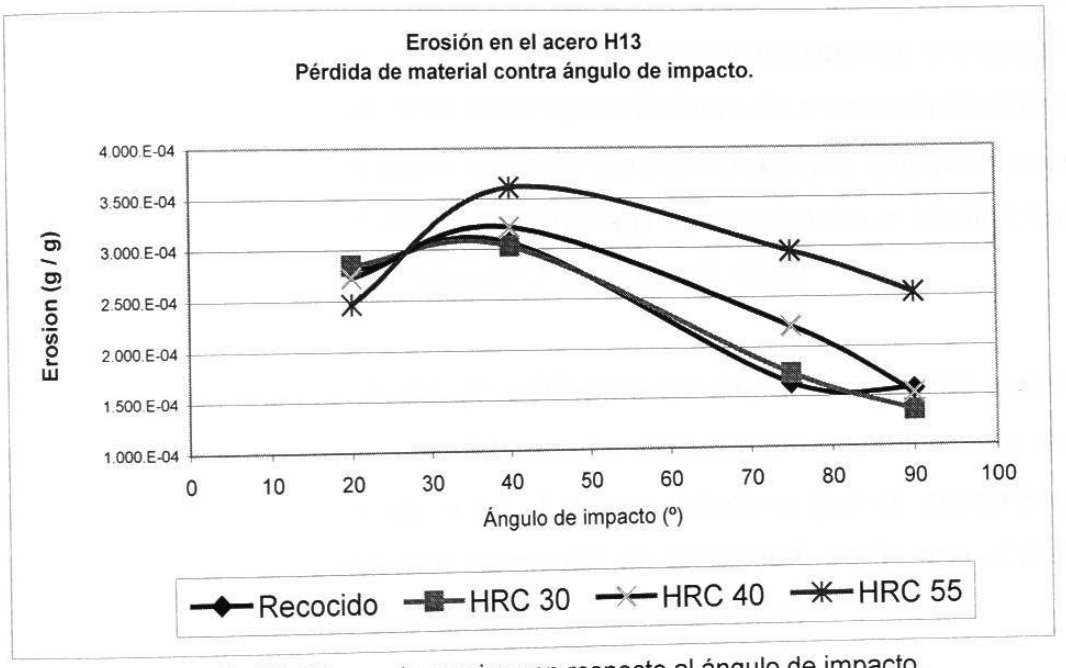


Fig.8.21 Desgaste erosivo con respecto al ángulo de impacto.

El comportamiento de los aceros bajo las condiciones ensayadas presentaron el mecanismo de erosión dúctil, debido a que el máximo valor de desgaste en todas las condiciones ensayadas se encontró en ángulos de impacto de 40° (ángulos bajos) por lo que se infiere que se presentó un desprendimiento de material con los mecanismos de desgaste propuestos por Finnie en la figura 4.11 de la sección 4.3.2 [24].

El desgaste erosivo en las probetas a ángulos de impacto de 90 y 75° (ángulos altos) en condición de recocido, templado y revenido con durezas de 30 y 40 HRC fue menor. Esto se debe a que la ductilidad del material absorbe gran parte de la energía cinética al indentar la superficie [12]. Además los ángulos de impacto a los que fueron erosionadas las probetas permitieron un menor desprendimiento en ellas debido a que en estos ángulos es muy difícil que

ocurran en un impacto único, requiriéndose impactos posteriores para el desprendimiento ulterior de la plaqueta, este mecanismo fue también revisado en la sección 4.3.2 figura 4.11 [24].

Para el caso de las probetas en condición de temple y revenido con dureza de 55 HRC se presentó un desgaste similar a 90º que al ángulo de 20º esto fue debido a que el comportamiento del mecanismo frágil presentado a el ángulo de 90º fue igual que el mecanismo de desprendimiento de material presentado al ángulo de 20º. Una tendencia muy similar fue encontrada por Guilden en aceros AISI 52100 en donde la transición dúctil-frágil se presentaba a medida que se incrementaba la dureza, ver figura 4.17 sección 4.6.1 [12].

Los ángulos de impacto de 40, 75 y 90º para las diferentes durezas mostraron una transición dúctil-frágil a medida que se incrementan los valores de dureza como es visto en la sección 4.5.1. Esto es debido a que al incrementar la dureza del material se reducen los niveles de tenacidad, por lo que el material empezará a comportarse con tendencia mas frágil [4.6.1].

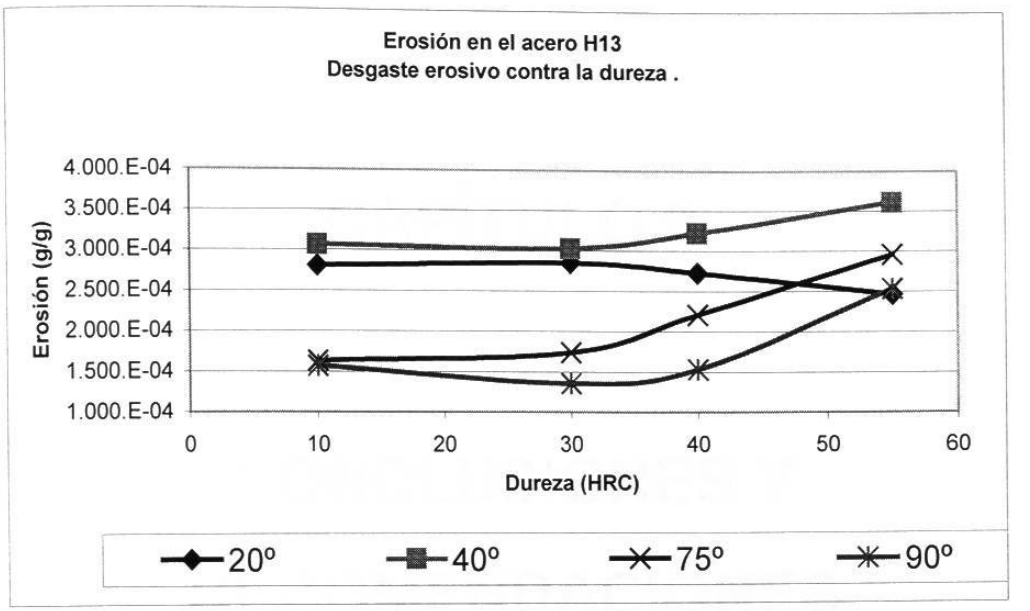


Fig 8.22 Desgaste erosivo con respecto a la dureza.

Las tendencias de los ángulos de impacto 40, 75, 90 demostraron que no existe un incremento en la resistencia a la erosión al incrementar la dureza del material H13 como ha sido discutido para otros materiales [12,18,24]. Al contrario, se observa un incremento en la erosión al incrementar la dureza, ver figura 8.22.

Se observó un incremento en la resistencia a la erosión para la tendencia del ángulo de impacto de 20º a medida que se incrementaba la dureza del material, esto es debido a la dificultad presentada por la partícula de realizar un arado o un microcorte en una superficie con una dureza cada vez más alta. El comportamiento del sistema de erosión realizado difiere de los resultados obtenidos en aceros grado herramienta y AISI 1045 empleados en el sistema de erosión analizado por Finnie, sección 4.4.5 figura 4.14 [12].

El ángulo de impacto de 40º fue el que presentó mayor desgaste para cada una de las durezas del material ensayadas. Esto fue debido al gran desprendimiento de material causado por este ángulo de impacto de las partículas de arena sílica, figura 4.11 [24].