

ABRIR 4.1 ESTUDIO COMPARATIVO.. (inicio)

	/ /	Superficie	Peso	Peso obtenido en cada ciclo de ensayo (g) (Velocidad de corrosión (cm/mes))					
Fig.	Tratamiento Térmico	expuesta (cm <sup>2</sup> )	inicial (g)	·	Número de	ciclo en el	ensayo Huey	,	
8*		( )	(6/	1	2	3	4	5	
52	Solubilizado	5,3684	3,2305	3,2100 (0,0072)	3,1892 (0,0074)	3,1675 (0,0074)	3,1461 (0,0075)	3,1221 (0,0079)	
55	723 K/5 min	5,8223	3,6273	3,6044 (0,0074)	3,5957 (0,0052)	3,5716 (0,0061)	3,5480 (0,0065)	3,5254 (0,0068)	
	723 K/15 min	5,8884	3,6344	3,6107 (0,0076)	3,5877 (0,0075)	3,5729 (0,0066)	3,5485 (0,0069)	3,5238 (0,0071)	
	723 K/60 min	5,9399	3,6543	3,6298 (0,0078)	<b>3,60</b> 61 (0,0077)	3,5815 (0,0078)	3,5561 (0,0078)	3,5299 (0,0079)	
	723 K/600 min	5,9349	3,6184	3,5971 (0,0072)	3,5713 (0,0074)	3,5459 (0,0076)	3,4291 (0,0077)	3,4049 (0,0077)	
59	723 K/6 000 min	6,0619	3,7438	3,7192 (0,0082)	3,6922 (0,0082)	3,6655 (0,0082)	3,6374 (0,0083)	3,6095 (0,0084)	
67	773 K/5 min	5,9118	3,6689	3,6443 (0,0079)	3,6205 (0,0079)	3,5962 (0,0078)	3,5715 (0,0079)	3,5456 (0,0080)	
	773 K/15 min	5,9274	3,5970	3,5713 (0,0083)	3,5469 (0,0081)	3,5213 (0,0082)	3,4944 (0,0083)	3,4685 (0,0082)	
	773 K/60 min	6,0686	3,8563	3,8328 (0,0073)	3,8083 (0,0075)	3,7840 (0,0075)	3,7587 (0,0077)	3,7335 (0,0077)	
	773 K/600 min	5,9988	3,7537	3,7295 (0,0076)	3,7020 (0,0082)	3,6700 (0,0089)	3,6271 (0,0100)	3,5974 (0,0100)	
68	773 K/6 000 min	5,9398	3,6200	3,5885 (0,0100)	3,5434 (0,0122)	3,4908 (0,0137)	3,4356 (0,0147)	3,3772 (0,0155)	

Tabla XXII: Resultados del ensayo Huey para el acero Bajo en Níquel (continua...).

.

		Superficie	Peso	Peso obtenido en cada ciclo de ensayo (g) (Velocidad de corrosión (cm/mes))						
Fig.	Tratamiento Térmico	expuesta (cm <sup>2</sup> )	inicial (g)	Número de ciclo en el ensayo Huey						
				1	2	3	4	5		
	823 K/5 min	5,0915	3,1020	3,0816 (0,0076)	3,0612 (0,0076)	3,0400 (0,0077)	3,0185 (0,0078)	2,9962 (0,0079)		
	823 K/15 min	5,6186	3,4300	3,4075 (0,0076)	3,3853 (0,0076)	3,3606 (0,0078)	3,3367 (0,0079)	3,3138 (0,0079)		
	823 K/60 min	5,5939	3,4694	3,4472 (0,0075)	3,4249 (0,0075)	3,4025 (0,0076)	3,3777 (0,0078)	3,3535 (0,0079)		
	823 K/600 min	6,0451	3,6727	3,4158 (0,0806)	2,4246 (0,1646)	2,2852 (0,1452)	1,4975 (0,1707)	1,0391 (0,1675)		
	823 K/6 000 min	6,1382	3,7717	3,1112 (0,2042)	2,2055 (0,2422)	1,4181 (0,2426)	0,6249 (0,2433)	Polvos (0,2363)		
	873 K/5 min	5,0915	3,5943	3,5716 (0,0076)	3,5491 (0,0076)	3,5252 (0,0077)	3,5019 (0,0077)	3,4777 (0,0078)		
56	873 K/15 min	6,0290	3,7153	3,6902 (0,0079)	3,6657 (0,0078)	3,6383 (0,0081)	3,6117 (0,0081)	3,5860 (0,0082)		
	873 K/60 min	5,2660	3,1862	3,1449 (0,0151)	3,0221 (0,0298)	2,9204 (0,0323)	2,6783 (0,0461)	2,3959 (0,0577)		
	873 K/600 min	5,6534	3,2107	2,9346 (0,0927)	2,1911 (0,1712)	1,6290 (0,1770)	1,1170 (0,1779)	0,5752 (0,1770)		
	873 K/6 000 min	5,2297	3,4723	2,9797 (0,1788)	2,1871 (0,2333)	1,4100 (0,2495)	0,7207 (0,2497)	0,1945 (0,2379)		
63	923 K/5 min	5,6807	3,5355	3,5097 (0,0086)	3,4836 (0,0087)	3,4500 (0,0095)	3,4153 (0,0100)	3,3790 (0,0104)		

-

Tabla XXII: Resultados del ensayo Huey para el acero Bajo en Níquel (continua...).

		Superficie	Peso	Peso obtenido en cada ciclo de ensayo (g) (Velocidad de corrosión (cm/mes))					
Fig.	Tratamiento Térmico	expuesta	inicial	Número de ciclo en el ensayo Huey					
8-		(· /		1	2	3	4	5	
64	923 K/15 min	5,6209	3,4645	3,4327 (0,0107)	3,3810 (0,0141)	3,3053 (0,0179)	3,2098 (0,0215)	3,1290 (0,0226)	
65	923 K/60 min	5,4223	3,2933	3,2377 (0,0197)	3,0424 (0,0444)	2,7319 (0,0663)	2,1927 (0,0975)	1,7252 (0,1112)	
66	923 K/600 min	6,4439	4,0144	3,8339 (0,0538)	3,1630 (0,1254)	2,4591 (0,1527)	1,7583 (0,1661)	1,1328 (0,1719)	
60	923 K/6 000 min	5,8910	3,5582	3,3111 (0,0796)	2,8068 (0,1211)	2,3287 (0,1320)	1,8890 (0,1344)	1,3775 (0,1405)	
57	973 K/5 min	5,2470	3,2728	3,2493 (0,0086)	3,2165 (0,0101)	3,1733 (0,0121)	3,1253 (0,0135)	3,0748 (0,0145)	
	973 K/15 min	5,6802	3,2783	3,2509 (0,0093)	3,2100 (0,0115)	3,1427 (0,0153)	3,0958 (0,0154)	3,0022 (0,0185)	
	973 K/60 min	5,3968	3,1987	3,1680 (0,0108)	3,0936 (0,0185)	2,9940 (0,0240)	2,8175 (0,0335)	2,6837 (0,0367)	
	973 K/600 min	5,9594	3,5755	3,3999 (0,0559)	3,0,13 (0,0882)	2,5700 (0,1068)	2,1039 (0,1172)	1,6625 (0,1218)	
61	973 K/6 000 min	5,9142	3,6840	3,3475 (0,1080)	2,8741 (0,1305)	2,3886 (0,1318)	1,8884 (0,1440)	1,4951 (0,1405)	
	1 023 K/5 min	5,3780	3,2677	3,2446 (0,0081)	3,2156 (0,0091)	3,1761 (0,0108)	3,1298 (0,0123)	3,0785 (0,0135)	
	1 023 K/15 min	5,7088	3,5416	3,5127 (0,0096)	3,4640 (0,0129)	3,4033 (0,0153)	3,3346 (0,0172)	3,2666 (0,0183)	

Tabla XXII: Resultados del ensayo Huey para el acero Bajo en Níquel (continua...)..

1

		Superficie	Peso	Peso obtenido en cada ciclo de ensayo (g) (Velocidad de corrosión (cm/mes))						
Fig.	Tratamiento Térmico	expuesta	inicial	Número de ciclo en el ensayo Huey						
8.		()		1	2	3	4	5		
	1 023 K/60 min	5,9996	3,6258	3,5944 (0,0099)	3,5423 (0,0132)	3,4734 (0,0160)	3,3951 (0,0182)	3,3066 (0,0202)		
	1 023 K/600 min	5,2296	3,1860	3,1447 (0,0149)	3,0712 (0,0208)	2,9820 (0,0247)	2,8710 (0,0286)	2,7517 (0,0315)		
	1 023 K/6 000 min	5,9395	3,6163	3,5271 (0,0285)	3,4383 (0,0285)	3,3700 (0,0262)	3,3000 (0,0253)	3,2300 (0,0247)		
	1 073 K/5 min	5,4420	3,3240	3,2993 (0,0086)	3,2650 (0,0103)	3,2209 (0,0120)	3,1722 (0,0134)	3,1288 (0,0138)		
	1 073 K/15 min	6,2465	3,8924	3,8641 (0,0086)	3,8271 (0,0100)	3,7821 (0,0113)	3,7321 (0,0122)	3,6767 (0,0131)		
	1 073 K/60 min	5,3725	3,2658	3,2378 (0,0099)	3,2019 (0,0114)	3,1570 (0,0129)	3,1076 (0,0140)	3,0528 (0,0151)		
	1 073 K/600 min	5,4215	3,9998	3,8981 (0,0094)	3,8557 (0,0109)	3,7994 (0,0128)	3,7291 (0,0148)	3,6397 (0,0172)		
	1 073 K/6 000 min	6,4274	3,6493	3,3836 (0,0785)	3,0095 (0,0944)	2,8792 (0,0758)	2,7523 (0,0662)	2,6590 (0,0585)		
58	1 173 K/5 min	6,1870	3,8469	3,8234 (0,0072)	3,7969 (0,0076)	3,7719 (0,0076)	3,7460 (0,0077)	3,7200 (0,0078)		
	1 173 K/15 min	5,3797	3,2263	3,2044 (0,0078)	3,1819 (0,0078)	3,1612 (0,0077)	3,1390 (0,0077)	3,1166 (0,0077)		
	1 173 K/60 min	5,8990	3,6154	3,5920 (0,0075)	3,5678 (0,0076)	3,5448 (0,0075)	3,5207 (0,0076)	3,4961 (0,0076)		

Tabla XXII: Resultados del ensayo Huey para el acero Bajo en Níquel (continua...).

ï

Fig.	Tratamiento Térmico	Superficie expuesta (cm <sup>2</sup> )	Peso inicial (g)	Peso obtenido en cada ciclo de ensayo (g) (Velocidad de corrosión (cm/mes)) Número de ciclo en el ensayo Huey				
				1	2	3	4	5
	1 173 K/600 min	6,0020	3,5269	3,5020 (0,0078)	3,4785 (0,0076)	3,4546 (0,0076)	3,4291 (0,0077)	3,4049 (0,0077)
62	1 173 K/6 000 min	5,1655	2,0878	2,0665 (0,0078)	2,0461 (0,0077)	2,0250 (0,0077)	2,0039 (0,0077)	1,9825 (0,0077)

Tabla XXII: Resultados del ensayo Huey para el acero Bajo en Níquel.

Al estudiar en la tabla XXII, los valores obtenidos de  $V_{corr}$  para el acero Bajo en Níquel tratado térmicamente, se puede observar que se presentan dos comportamientos claramente diferenciados, que se pueden apreciar en las micrografías que se mostraran en las siguientes páginas. El primero es el que muestra una  $V_{corr}$  aproximadamente constante y similar a la  $V_{corr}$  del material solubilizado; comportamiento que es explicable al sufrir el material, en toda la superficie expuesta, un fenómeno de corrosión generalizada. El segundo comportamiento es el que muestra una  $V_{corr}$  que se va diferenciando de la del material solubilizado, aumentando en magnitud al incrementarse el tiempo de ensayo, llegando a obtenerse valores mayores hasta en uno o dos órdenes de magnitud respecto a la del material solubilizado; este comportamiento se encuentra claramente relacionado con un aumento del tiempo de tratamiento térmico, por lo que el mecanismo de corrosión va cambiando, pasando de ser generalizado a ser intergranular, por lo que se localiza en el límite de grano provocando la descohesión de la estructura y por lo tanto se obtienen mayores  $V_{corr}$ 

En la figura 53, se puede observar los mencionados comportamientos. El material solubilizado, que presentan un comportamiento similar al tratado térmicamente a 873 K/5 min, tiene una  $V_{corr}$  aproximadamente constante en todos los ciclos de ensayo;

al aumentar el tiempo de tratamiento térmico la  $V_{corr}$  comienza a incrementarse al aumentar el ciclo de ensayo, para finalmente llegar a ser uno o dos de magnitud mayor a la  $V_{corr}$  obtenida para el estado de solubilización.

En la figura 54, elaborada con los resultados de la tabla XXII, se muestra la velocidad de corrosión obtenida tras el ensayo Huey, en función del tiempo de tratamiento de sensibilización. Un estudio detallado de la figura nos conduce a las siguientes observaciones:

- Para todas las condiciones de tratamiento térmico la  $V_{corr}$  obtenida para el acero Bajo en Níquel, es mayor a la velocidad de sensibilización,  $V_{sen}$ , propuesta como limite de sensibilización a la corrosión intergranular.

- Para las temperaturas comprendidas entre 773 y 1 073 K, un aumento del tiempo de tratamiento térmico trae como consecuencia un aumento de la  $V_{corr}$ , siendo la forma de la curva similar a las obtenidas por fenómenos de nucleación y crecimiento, por lo que el aumento de la  $V_{corr}$  se asocia a la presencia de precipitados en el material.

- Un aumento del tiempo de tratamiento, a una determinada temperatura, puede traer consigo cambios en la  $V_{corr}$  en hasta dos ordenes de magnitud.

- Para temperaturas menores o mayores a 773 y 1 073 K, respectivamente, la  $V_{corr}$  se mantiene constante con el tiempo de tratamiento.

El diagrama TTS se establece de acuerdo al criterio de velocidad de corrosión intergranular, de modo que las muestras tratadas térmicamente que presenten una  $V_{corr}$  mayor a la  $V_{sen}$ , se consideran sensibilizadas a la corrosión intergranular, mientras que las que tienen una  $V_{corr}$  menor se consideran como no sensibilizadas. Como se observo en la figura 54, para el acero Bajo en Níquel todas las muestras tratadas térmicamente presentan una  $V_{corr}$  mayor a la  $V_{sen}$  por presentar fenómenos de corrosión generalizada e intergranular, por lo tanto no se podría trazar el diagrama TTS de acuerdo con el criterio tradicional. Al presentar este material un mecanismo de tipo mixto, y siendo uno de los objetivos proponer un diagrama TTS frente a la corrosión intergranular, se planteará, en el apartado 4.1.5., un nuevo criterio que permita elaborar el mencionado diagrama a partir de los datos obtenidos en el ensayo Huey.



Figura 53: Variación de la velocidad de corrosión en función del ciclo de ensayo para un tratamiento térmico de sensibilización realizado a 873 K, para el acero Bajo en Níquel. Ensayo Huey.



Figura 54: Variación de la velocidad de corrosión con el tiempo de tratamiento de sensibilización, para el acero Bajo en Níquel. Ensayo Huey.

## a) Influencia de la temperatura de tratamiento térmico.

En las figuras 55 - 58 se muestran las microestructuras que presentan las muestras tratadas térmicamente a tiempos de 5 min, en orden creciente de temperatura. A bajas temperaturas, 723 y 873 K, la microestructura no presenta signos de ataque intergranular, pero se pone de manifiesto un acusado ataque generalizado. A la temperatura de 973 K se presenta una mayor velocidad de corrosión posiblemente debido a que aparece simultáneamente corrosión intergranular y generalizada (figura 57). Un aumento de la temperatura de tratamiento disminuye el posible efecto de sensibilización a la corrosión intergranular, presentándose microestructuras y velocidades de corrosión semejantes a las que existen a bajas temperaturas (figura 58).

El aumento del tiempo de exposición a 6 000 min, muestra un ligero aumento en la  $V_{corr}$  en las muestras tratadas a 723 K detectándose para todos los tiempos de tratamiento un ataque prácticamente generalizado (figuras 55 y 59).

El aumento progresivo de la temperatura, produce un cambio en la tendencia del mecanismo predominante (generalizada y/o intergranular); a 923 K (figura 60) se observa un fuerte ataque mixto: intergranular y generalizado; a 973 K el ataque es característico intergranular (figura 61), para finalmente a 1 173 K tener un ataque nuevamente de tipo generalizado, lo que se puede asociar a un fenómeno de desensibilización (figura 62).

A partir de los resultados obtenidos, se pone de manifiesto que al aumentar la temperatura, la sensibilización se produce a tiempos más cortos, localizándose el menor de los tiempos a la temperatura de 1 048 K, lugar donde se debe localizar la "nariz" de la curva.



Figura 55: Acero Bajo en Níquel tratado a 723 K durante 5 min, sometido al ensayo Huey, mostrando corrosión generalizada ( $V_{corr} = 0,0068$  cm/mes).



Figura 56: Acero Bajo en Níquel tratado a 873 K durante 5 min, sometido al ensayo Huey, mostrando corrosión generalizada ( $V_{corr} = 0,0078$  cm/mes).



Figura 57: Acero Bajo en Níquel tratado a 973 K durante 5 min, sometido al ensayo Huey, mostrando fuerte corrosión generalizada ( $V_{corr} = 0,0145$  cm/mes).



Figura 58: Acero Bajo en Níquel tratado a 1 173 K durante 5 min, sometido al ensayo Huey, mostrando corrosión generalizada ( $V_{corr} = 0,0079$  cm/mes).



Figura 59: Acero Bajo en Níquel tratado a 723 K durante 6 000 min, sometido al ensayo Huey, mostrando corrosión generalizada ( $V_{corr} = 0,0084$  cm/mes).



Figura 60: Acero Bajo en Níquel tratado a 923 K durante 6 000 min, sometido al ensayo Huey, mostrando fuerte corrosión intergranular y generalizada  $(V_{corr} = 0,1405 \text{ cm/mes}).$ 



Figura 61: Acero Bajo en Níquel tratado a 973 K durante 6 000 min, sometido al ensayo Huey, mostrando fuerte corrosión intergranular ( $V_{corr} = 0,1405 \text{ cm/mes}$ ).



Figura 62: Acero Bajo en Níquel tratado a 1 173 K durante 6 000 min, sometido al ensayo Huey, mostrando corrosión generalizada ( $V_{corr} = 0,0077$  cm/mes).

## b) Influencia del tiempo de tratamiento térmico.

Como se ha venido comentando, el fenómeno de corrosión generalizada esta presente en todos los casos, y se presenta como ataque preferente para tratamientos iguales o menores a 15 min, como se pudo apreciar en la figura 54, algunos ejemplos se mostraron en las microestructuras de las figuras 55 a 58, para tiempos de tratamiento de 5 min, en orden creciente de temperatura. Al fijar una temperatura comprendida entre 773 y 1 073 K, y aumentar el tiempo de tratamiento, la velocidad de corrosión se asociada a un fenómeno mixto de corrosión generalizada y de corrosión intergranular.

De acuerdo a los datos cuantitativos y metalográficos obtenidos, se demuestra que cuanto mayor es el tiempo de tratamiento, para una temperatura dada, más intenso es el ataque intergranular y la separación entre granos se hace evidente, llegando a provocar el desprendimiento de éstos. Esto se traduce en un aumento importante de la velocidad de corrosión. Este hecho queda de manifiesto en las figuras 63 a 66, donde para una temperatura de tratamiento de 923 K, se muestra la influencia del incremento del tiempo de tratamiento térmico, en la morfologia de ataque en las muestras sometidas al ensayo Huey.

A menores temperaturas, en cambio, la influencia del tiempo de tratamiento en el tipo de corrosión es más lento, como se puede apreciar a la temperatura de 773 K. A tiempos de 6 000 min se aprecia una mayor influencia de la corrosión intergranular sobre la corrosión generalizada, como se aprecia en las figuras 67 y 68.

Como se mencionó, y se observa en la figura 54, al aumentar la temperatura de tratamiento térmico, la mayor influencia de la corrosión intergranular se aprecia rápidamente a menores tiempos de tratamiento de sensibilizacion; el mínimo tiempo se presenta a 923 K. Al aumentar la temperatura la influencia de la corrosión intergranular se retarda hacia mayores tiempos, obteniéndose a 1 173 K, corrosión fundamentalmente generalizada, como se observó en las figuras 58 y 62.



Figura 63: Acero Bajo en Níquel tratado a 923 K durante 5 min, sometido al ensayo Huey, mostrando corrosión generalizada y muy suave corrosión intergranular  $(V_{corr} = 0,0104 \text{ cm/mes}).$ 



Figura 64: Acero Bajo en Níquel tratado a 923 K durante 15 min, sometido al ensayo Huey, mostrando corrosión generalizada con una mayor corrosión intergranular  $(V_{corr} = 0,0226 \text{ cm/mes}).$ 



Figura 65:

Acero Bajo en Níquel tratado a 923 K durante 60 min, sometido al ensayo Huey, mostrando corrosión intergranular ( $V_{corr} = 0,1112$  cm/mes).



Figura 66: Acero Bajo en Níquel tratado a 923 K durante 600 min, sometido al ensayo Huey, mostrando corrosión intergranular ( $V_{corr} = 0,1719$  cm/mes).



Figura 67: Acero Bajo en Níquel tratado a 773 K durante 5 min, sometido al ensayo Huey, mostrando corrosión generalizada ( $V_{corr} = 0,0080$  cm/mes).



Figura 68: Acero Bajo en Níquel tratado a 773 K durante 6 000 min, sometido al ensayo Huey, mostrando corrosión generalizada y corrosión intergranular  $(V_{corr} = 0,0155 \text{ cm/mes}).$ 

ABRIR 4.1 ESTUDIO COMPARATIVO... (continuación)