

# DETERMINACIÓN DE LA CORROSIÓN DE UN SISTEMA O<sub>2</sub>-SALMUERA-ACERO AISI 1020, EN UNA CELDA DE IMPACTO HIDRODINÁMICA

D. Y. PEÑA\*; M. T. SUÁREZ\*\*

\*Profesor Titular, Esc. Ing. Metalúrgica y Ciencias de los Materiales. Grupo de Investigaciones en Corrosión. Universidad Industrial de Santander.

\*\*M.Sc, Ingeniera Química Universidad Industrial de Santander.  
dypena@uis.edu.co

*Fecha Recepción: 13 de Febrero de 2009*

*Fecha Aceptación: 18 de Marzo de 2009*

---

## RESUMEN

Existen pocas correlaciones para predecir los valores de los coeficientes de transferencia de masa y esfuerzo de corte en los estudios de corrosión de laboratorio que no han sido validadas para todos los sistemas corrosivos, y además no se encuentran expresiones que describan la velocidad de corrosión en función de dichos parámetros. En este trabajo se determinaron los valores de transferencia de masa y esfuerzo de corte en la pared por medio de la corriente límite y se compararon con los predichos en correlaciones para la geometría de la celda de impacto. Se calcularon las velocidades de corrosión para cada una de las condiciones evaluadas. La reacción de corrosión del mecanismo de control mixto estuvo parcialmente controlada por la transferencia de masa y carga, por lo que no todas las correlaciones se ajustaron a los resultados. Además se obtuvo una relación matemática entre la velocidad de corrosión, las variables hidrodinámicas y de transferencia de masa.

**Palabras claves:** *Transferencia de Masa, Esfuerzo de Corte en la Pared, Corriente Límite Electroquímica.*

## ABSTRACT

The correlations to predict the coefficients values of mass transfer and shear stress in laboratory studies of corrosion have not been validated for all systems and besides there are not equations that describe the corrosion rate on the basis of these parameters. In this work, the values of mass transfer and shear stress in the wall by using the current limit and were compared with those predicted in correlations for the geometry of the cell of impact. Corrosion rates for each of the conditions tested were calculated. The reaction of the corrosion mechanism mixed was partially controlled by mass transfer and charge, so not all the correlations were adjusted with the results. A mathematical relationship between the corrosion rate of the hydrodynamic variables and mass transfer was obtained.

**Keywords:** *Mass Transfer, Shear Stress, Electrochemical Limit Current.*

---

## INTRODUCCIÓN

Se han propuesto en la bibliografía, correlaciones que relacionan variables específicas de los fenómenos de transferencia de masa y momento para estudios de corrosión basados en diferentes geometrías de celdas electroquímicas, que han sido deducidas independientemente del fenómeno de corrosión, pero

se han venido usando para obtener un conocimiento más claro sobre sus mecanismos. Diversos autores como Postlethwaite [1], Tromans [2], LLevbare [3] y Song [4]; han desarrollado estudios de la velocidad de corrosión en función de la velocidad del fluido para diferentes materiales expuestos a sistemas acuosos con presencia de oxígeno, pero en la mayoría de casos en flujos a través de tuberías.

Con base en lo anteriormente mencionado se ha observado que se puede proponer una correlación que permita medir la velocidad de corrosión en función de variables como la transferencia de masa y el esfuerzo de corte, basados en datos experimentales obtenidos para un sistema de una fase líquida acuosa al 3% de NaCl saturado con aire, en un electrodo de acero al carbono expuesto en diferentes geometrías de celdas electroquímicas como las celdas de impacto y electrodos ensamblados en circuitos hidrodinámicos.

Los fenómenos de corrosión se han estudiado en el laboratorio con un grado de acercamiento mayor a las condiciones reales de campo. Debido a que el fenómeno de la corrosión está basado en reacciones electroquímicas, los primeros diseños de equipos de laboratorio fueron creados para hacer un seguimiento de este tipo de reacciones sin tener en cuenta otras variables como la velocidad del fluido.

Además, los estudios a nivel de laboratorio tuvieron grandes limitaciones para el estudio de los problemas de corrosión en campo. Las limitaciones fueron principalmente de dos tipos; primero, las celdas electroquímicas fueron diseñadas para trabajar en condiciones estáticas, las cuales no simulaban las condiciones reales del fluido en el campo y segundo, la utilización de la fase acuosa como único componente del fluido presente en el sistema, dejando de lado el efecto que pueden tener otras fases en los fenómenos de corrosión.

La limitante en el movimiento del fluido es superada con la producción de equipos que permiten poner en movimiento el sistema. Dentro de los equipos de laboratorio más comunes para estudiar el efecto de la velocidad del fluido sobre la corrosión de las líneas de transporte en tubería, se encuentran el electrodo de disco rotatorio (RDE), el electrodo de cilindro rotatorio (RCE), el flujo en tuberías, la celda de impacto (Jet Impingement) entre otras, tal como lo expone en sus trabajos Efirid [5,6].

La velocidad del fluido fue usada como el parámetro primario para comparación de los resultados de ensayos de laboratorio con las aplicaciones en campo, pero este concepto empezó a cambiar a partir de los años 70. Los primeros datos que mostraban relación entre el parámetro hidrodinámico de esfuerzo de corte en la pared ( $\tau_w$ ) con la corrosión fueron publicados por

Efirid en 1977 para aleaciones de cobre en agua de mar. Se entiende ahora que el flujo de fluidos debe ser expresado en términos generales relacionados con parámetros comunes a todos los sistemas hidrodinámicos que permiten la aplicación de los datos de ensayo de laboratorio a las operaciones de campo.

Estos parámetros son calculados de ecuaciones empíricas desarrolladas para caracterizar el flujo de fluidos. Como un resultado de estas consideraciones, la determinación experimental de los efectos del flujo de fluido en la corrosión involucran el cálculo de uno o más parámetros los cuales incluyen esfuerzo de corte en la pared, ( $\tau_w$ ), número de Reynolds (Re), número de Sherwood (Sh) y coeficiente de transferencia de masa (K). Los ensayos de corrosión de laboratorio son conducidos de una forma que permiten el cálculo hidrodinámico de parámetros independientes tales como K y  $\tau_w$ .

Para el desarrollo experimental particular de este estudio se construyó una nueva celda de impacto, y se establecieron las metodologías de experimentación de las tres geometrías evaluadas.

Por otra parte, aprovechando los datos experimentales obtenidos se validaron las correlaciones de transferencia de masa y momento para el sistema de estudio y se dilucidó un mecanismo de corrosión del acero al carbono expuesto a este medio.

Finalmente, con este estudio se ha pretendido lograr un mejor conocimiento de la influencia de las variables hidrodinámicas y de transferencia de masa en la corrosión, partiendo de un sistema de corrosión conocido.

## PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El arreglo general de la celda de impacto se muestra en la Figura 1. El fluido se produce por un cilindro fabricado en teflón de 1,3 cm de diámetro con un hueco maquinado en el centro de 0,2 cm de diámetro. La longitud del cilindro (9,0 cm) se diseñó para asegurar la estabilización del flujo antes de salir y producir un fluido estable en la superficie de ensayo.

La celda incide en el centro de la superficie plana de la muestra de ensayo, la cual consistió de

dos anillos concéntricos de 0,5 cm de espesor separados una distancia de 0,2 cm, los cuales estaban empotrados en un portaelectrodo construido en teflón.

El electrodo de trabajo consistió en un anillo maquinado en acero al carbono AISI 1020 y el electrodo auxiliar en acero inoxidable 316. El electrodo de trabajo se ubicó frente a la pared del jet,

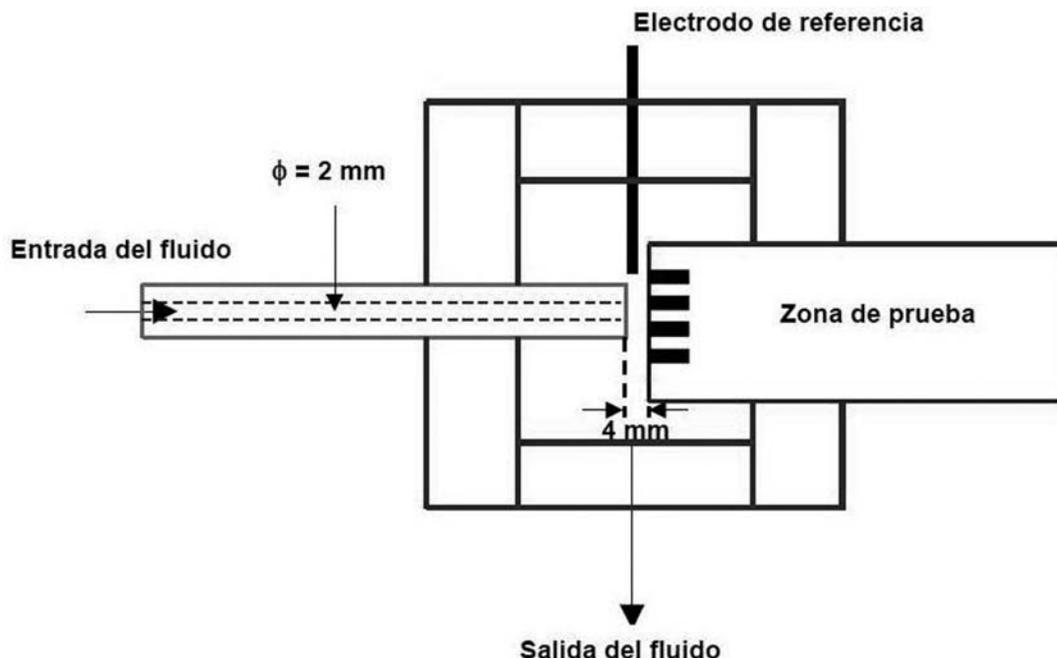


Figura 1. Diagrama de la celda de impacto (Jet Impingement).

en las posiciones radiales  $r/r_0 = 2$  y  $r/r_0 = 3$ . Este arreglo resultó en áreas expuestas de  $0,51 \text{ cm}^2$  para el anillo ubicado en la posición radial  $r/r_0 = 2$  y  $0,67 \text{ cm}^2$  en la posición radial  $r/r_0 = 3$ .

El material de ensayo usado para los experimentos de corrosión fue acero al carbono AISI 1020. Las superficies expuestas de todas las muestras de ensayo se pulieron con papel abrasivo de carburo de silicio, SiC, (lijas 240, 320, 400 y 600), se desengrasaron con etanol y acetona, enjuagaron con agua destilada y se secaron con aire caliente seco, de acuerdo con la norma ASTM G1-83 inmediatamente antes de cada prueba.

La solución de ensayo para todos los experimentos fue una solución acuosa al 3% de NaCl saturada con aire. El rango de temperatura de estudio fue entre 25 y 45°C, evaluando una condición intermedia a 35°C. Con estas temperaturas se quiso reflejar algunas condiciones operacionales de planta, donde era importante tener en cuenta los límites de operación y precisión de los equipos de medición de oxígeno disuelto disponibles en el laboratorio.

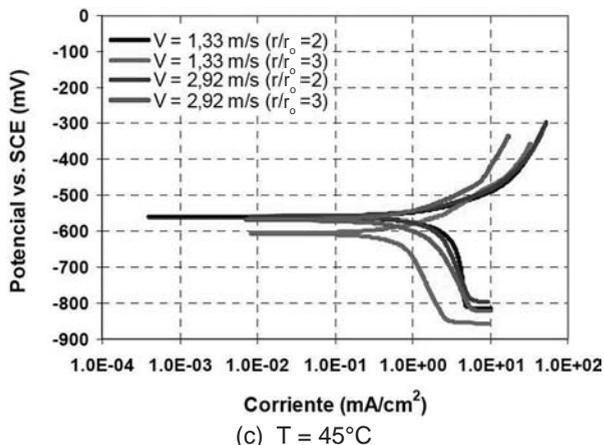
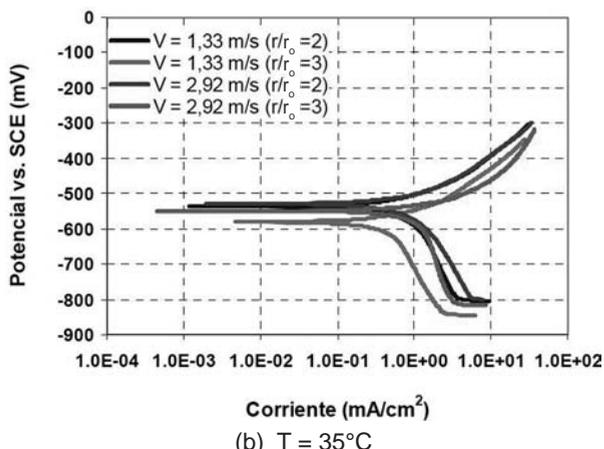
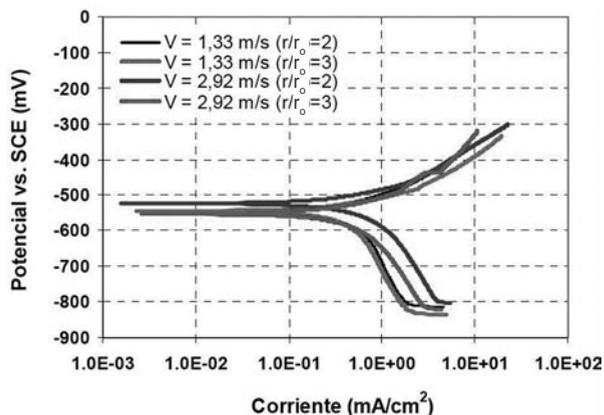
Se estudiaron 2 niveles de velocidades, los cuales fueron elegidos dentro de los rangos de trabajo para el número de Reynolds que permitieran la validación de las respectivas correlaciones. La concentración de oxígeno disuelto, pH y concentración de Fe disuelto se miden en un espectrofotómetro portátil HACH.

Una vez se preparaba la solución y el material de ensayo, se realizaba el montaje de la celda, se monitoreaba la concentración de oxígeno disuelto y el pH de la solución y se daba inicio a las pruebas electroquímicas. En primer lugar se monitoreó la estabilidad del potencial de corrosión corriendo una prueba de  $E_{\text{corr}}$  vs Tiempo; esta prueba se realizaba durante el tiempo que fuese necesario hasta que se alcanzara la estabilidad, que fue asumida bajo condiciones en las que el potencial presentaba una variación inferior a 0.2 mV/min. Alcanzada la estabilidad se seguía una rutina de pruebas electroquímicas así: Resistencia a la Polarización Lineal, Espectroscopia de Impedancia Electroquímica, Resistencia a la Polarización Lineal, Curva de Tafel.

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

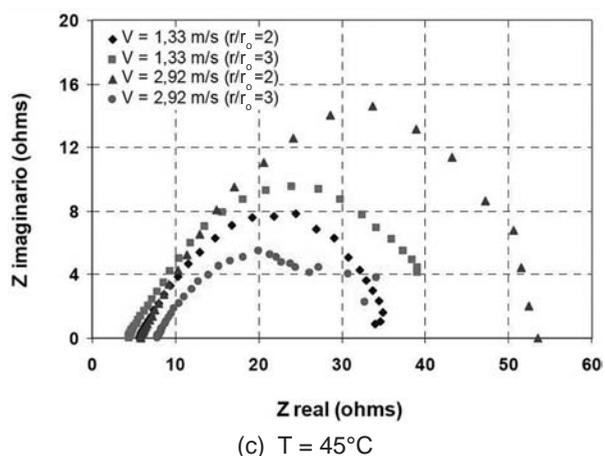
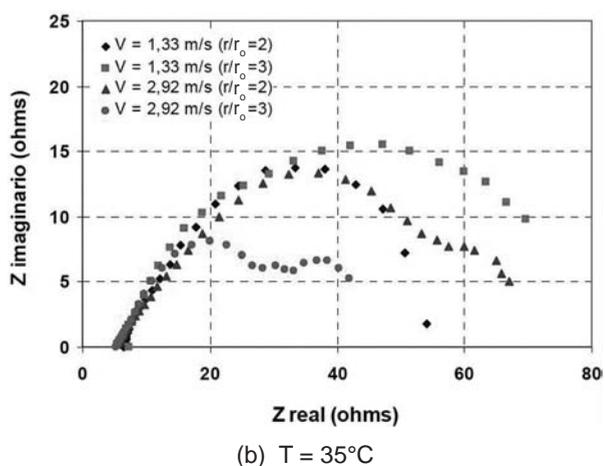
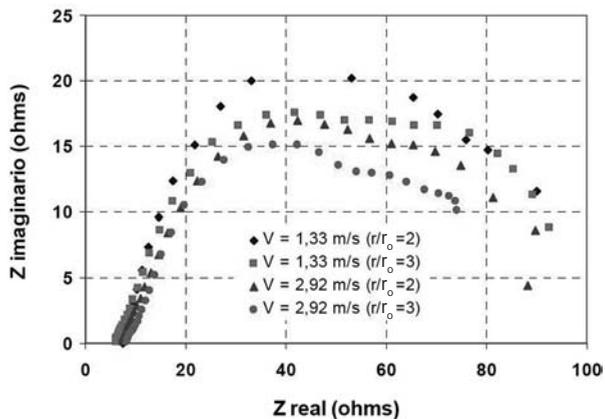
### Efecto de la Velocidad.

En las siguientes curvas de Tafel, se muestra el efecto de la velocidad de flujo, y se presenta el efecto de la posición radial ( $r/r_0$ ), del electrodo de trabajo en la celda de impacto, ver Figura 2.



**Figura 2.** Influencia de la velocidad de flujo y posición radial sobre la curva de Tafel del acero 1020 en contacto con solución NaCl al 3%.

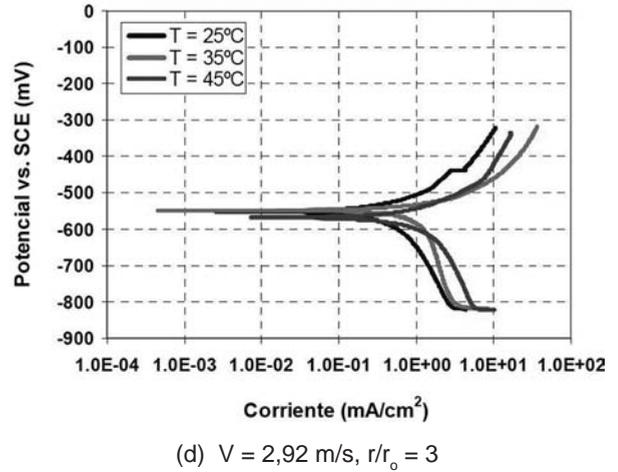
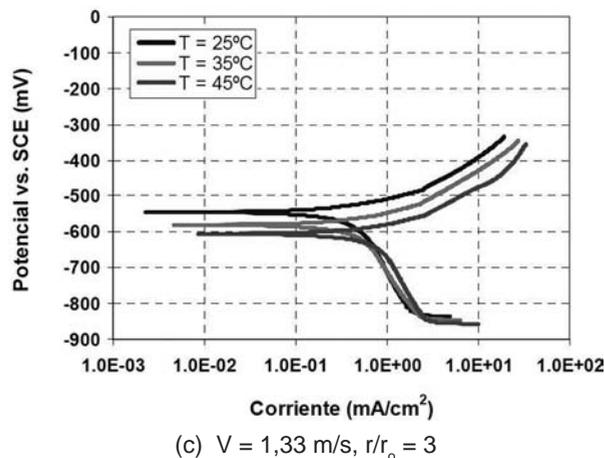
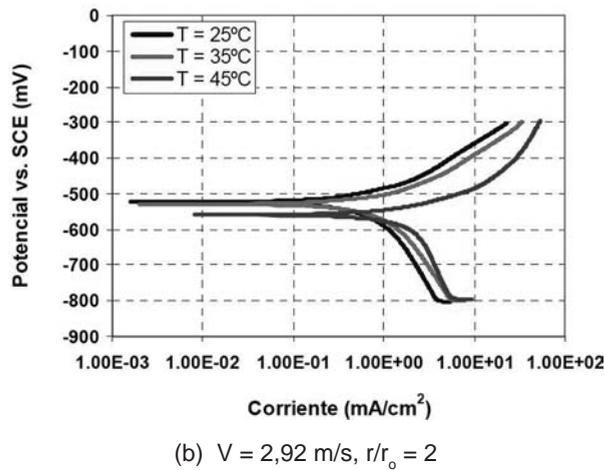
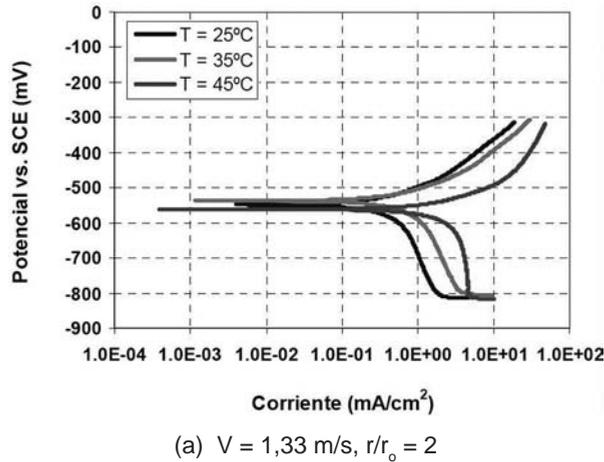
Igual que en las curvas de Tafel, en los diagramas de impedancia, además del efecto de la velocidad de flujo, se presenta el efecto de la posición radial del electrodo de trabajo en la celda de impacto, ver Figura 3.



**Figura 3.** Efecto de la velocidad de flujo y posición radial en el diagrama de Nyquist.

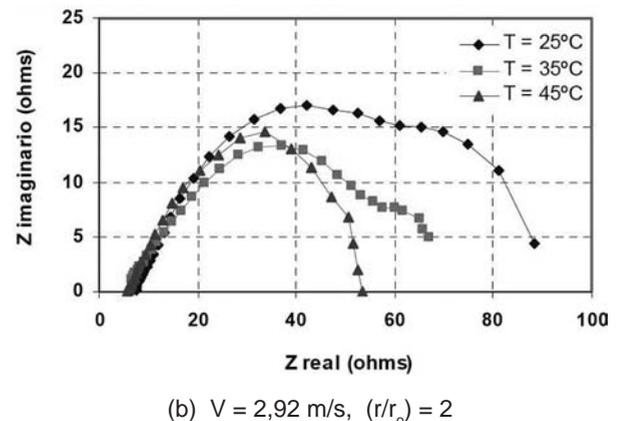
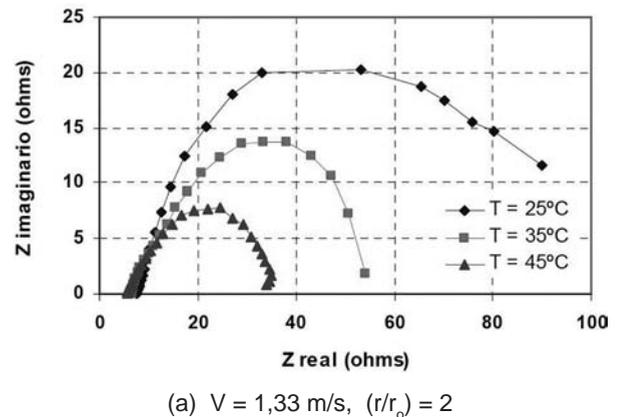
**Efecto de la Temperatura.**

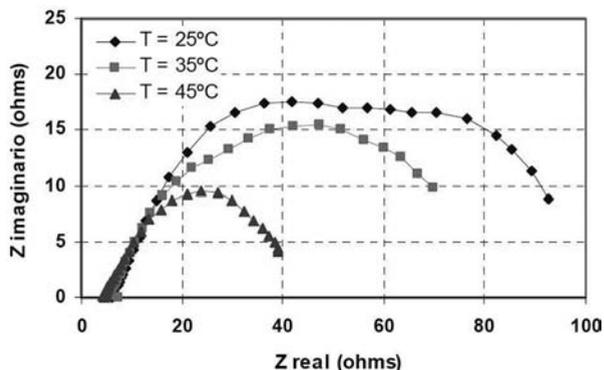
En la Figura 4, además de mostrarse el efecto de la temperatura en las curvas de Tafel, también se presenta el efecto de la posición radial ( $r/r_o$ ) para cada una de las velocidades de flujo en la boquilla de la celda de impacto.



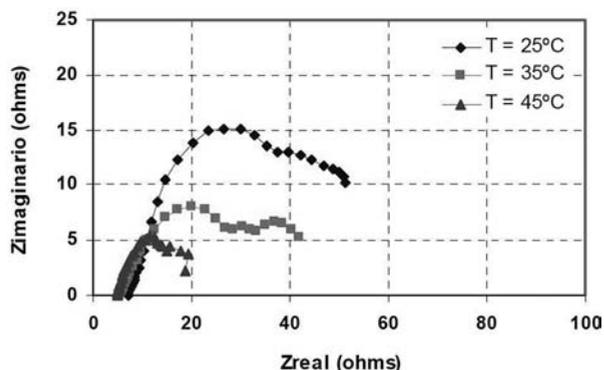
**Figura 4.** Influencia de la temperatura y posición radial sobre la curva de Tafel del acero 1020.

Los valores altos en las pendientes Tafel indicarían la presencia de una capa de productos de corrosión que se formó durante el impacto del chorro sobre la superficie [16]. En la Figura 5 se presentan los diagramas de Nyquist para las mismas condiciones experimentales.





(c)  $V = 1,33$  m/s,  $(r/r_0) = 3$



(d)  $V = 2,92$  m/s  $(r/r_0) = 3$

**Figura 5.** Influencia de la temperatura y posición radial sobre el diagrama de impedancia del acero 1020.

De acuerdo al trabajo de Silverman [7] tomado como referencia para el cálculo de la velocidad de corrosión se tienen en cuenta los parámetros electroquímicos de resistencia a la polarización lineal y pendientes anódica y catódica de Tafel.

La impedancia de polarización disminuyó con el aumento en la relación  $r/r_0$ , lo que sugiere que existe una influencia sinérgica de la difusión y la difusión convectiva en la región de estancamiento en el electrodo de trabajo, similar a lo encontrado por Orazem [15].

En la Tabla 1 se presenta los valores obtenidos para cada uno de estos parámetros y las respectivas velocidades de corrosión encontradas en la geometría estudiada a las diferentes condiciones de experimentación.

La velocidad de transferencia de masa se puede medir mediante la técnica de corriente de difusión límite electroquímica. En la Tabla 2 se presentan los valores obtenidos para las pruebas en laboratorio.

**Tabla 1.** Parámetros electroquímicos obtenidos de las pruebas.

$T$ (°C)	$V$ (m/s)	$(r/r_0)$	$V_{cor}$ (mpy)
25	1,33	2	430,19
		3	293,54
	2,92	2	487,84
		3	396,84
35	1,33	2	711,49
		3	206,46
	2,92	2	805,76
		3	551,84
45	1,33	2	873,60
		3	796,49
	2,92	2	1401,24
		3	938,03

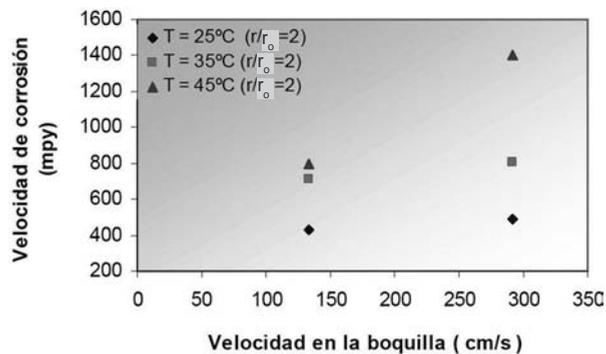
**Tabla 2.** Corrientes límite obtenidas experimentalmente.

$T$ (°C)	$V_{JET}$ (m/s)	$(r/r_0)$	$i_{Limite}$ Jet (mA/cm <sup>2</sup> )
25	1,33	2	4,00
		3	2,60
	2,92	2	6,80
		3	4,00
35	1,33	2	6,00
		3	3,20
	2,92	2	8,00
		3	4,80
45	1,33	2	7,00
		3	3,60
	2,92	2	10,0
		3	8,00

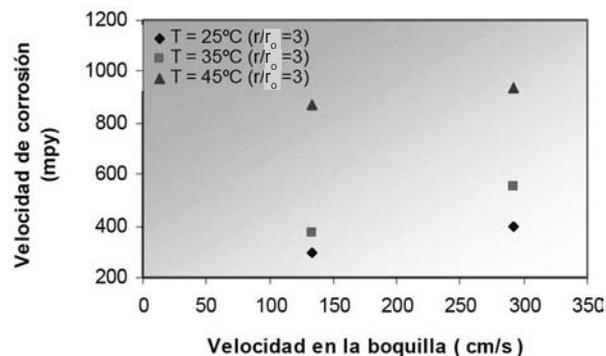
Para reacciones controladas por la transferencia de masa se ha observado que un aumento en la agitación ocasiona el incremento en la densidad de corriente límite, lo que supone un aumento en la velocidad de corrosión.

Por otra parte, cuando el proceso de corrosión es controlado por la transferencia de carga, la velocidad de corrosión se hace generalmente independiente de la velocidad de flujo. En condiciones estáticas la velocidad de corrosión fue baja (5-8 mpy), pero cuando el fluido se mantuvo en movimiento los resultados cambiaron considerablemente.

Además se debe tener en cuenta la posición radial del electrodo, por lo que acuerdo con los resultados de la Tabla 2, a una posición radial constante, se presenta un aumento de la velocidad de corrosión a mayores velocidades de flujo. Sin embargo, en el caso de velocidad constante y aumento de la posición radial el efecto es contrario; por ejemplo, para el caso de velocidad de flujo de 133 cm/s (25°C), la velocidad de corrosión disminuyó de 430 a 293 mpy. Esto concuerda con lo reportado por Demoz [14] para diferentes posiciones del electrodo de trabajo con respecto a la distancia de la boquilla del chorro. La Figura 6 presenta el efecto de la velocidad de flujo sobre la velocidad de corrosión para el acero al carbono AISI 1020 en la solución de trabajo.



(a) Posición radial,  $r/r_0 = 2$



(b) Posición radial,  $r/r_0 = 3$

**Figura 6.** Efecto de la velocidad de flujo sobre la velocidad de corrosión para el sistema a diferentes temperaturas.

Los resultados obtenidos muestran la influencia que tiene la posición radial en la velocidad de corrosión. A una velocidad de flujo constante la velocidad de corrosión disminuye con el aumento

de la posición radial; esto puede ocurrir debido a que parámetros como la transferencia de masa y el esfuerzo de corte en la pared varían con la distancia radial.

Cerca del punto de estancamiento la velocidad se incrementa ligeramente con la distancia radial con un valor máximo de aproximadamente la posición  $r =$  diámetro de la boquilla. Más allá de este punto, las velocidades de transferencia disminuyen con la distancia, lo cual se puede relacionar con los diferentes regímenes de flujo que se desarrollan a lo largo de la superficie del electrodo.

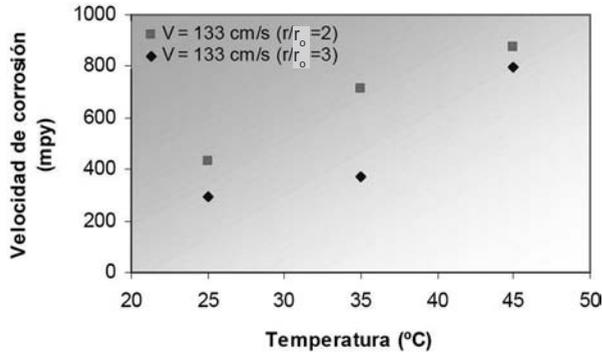
Las películas de productos de oxidación son un factor importante en los procesos de corrosión, debido a su carácter protector; es decir, aumentará o disminuirá, la velocidad de corrosión de un sistema específico, en determinado momento.

Para las pruebas sin agitación, se formó una capa de óxido gruesa sobre la superficie metálica, la cual bloquea la difusión del oxígeno, ocasionando velocidades de corrosión bajas, sin embargo al inducir movimiento al fluido, los esfuerzos de corte disminuyen el espesor de la capa generando un aumento en la velocidad de corrosión.

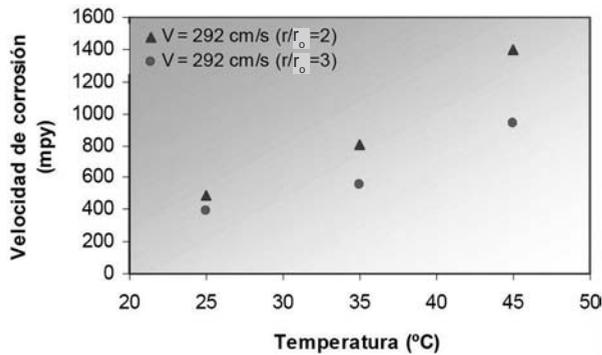
En el caso del acero al carbono inmerso en solución de NaCl saturada con aire, el aumento de la velocidad de flujo facilitará la disponibilidad de oxígeno y formación de productos como el hidróxido de hierro, el cual precipita en cercanías de la superficie metálica y actúa como una barrera protectora, cuya estabilidad puede ser afectada por factores como la temperatura y esfuerzos de corte.

En la celda de impacto se presenta nuevamente el comportamiento de disminución de la velocidad de corrosión con el aumento de la posición radial a las diferentes temperaturas evaluadas.

Además de los diferentes regímenes de flujo que se observan en este tipo de geometría, el espesor de la capa límite hidrodinámica juega un papel importante, ya que los fenómenos de transferencia de masa y momento se llevan a cabo dentro de la capa viscosa, los cuales se hacen menos influyentes en el proceso corrosivo al aumentar el espesor de dicha capa con la posición radial del electrodo; ver Figura 7.



(a) Velocidad = 133 cm/s



(a) Velocidad = 292 cm/s

Figura 7. Efecto de la temperatura sobre la velocidad de corrosión, a diferentes velocidades de flujo y r/r<sub>0</sub>.

**Validación de las Correlaciones.**

Para el cálculo de los coeficientes de transferencia de masa (K), se hizo uso del parámetro de corriente límite electroquímica y de las propiedades del fluido para el cálculo de los números adimensionales de Sh, Re y Sc. En la Figura 8 se presenta los datos experimentales obtenidos comparados con los predichos por las correlaciones para la celda de impacto.

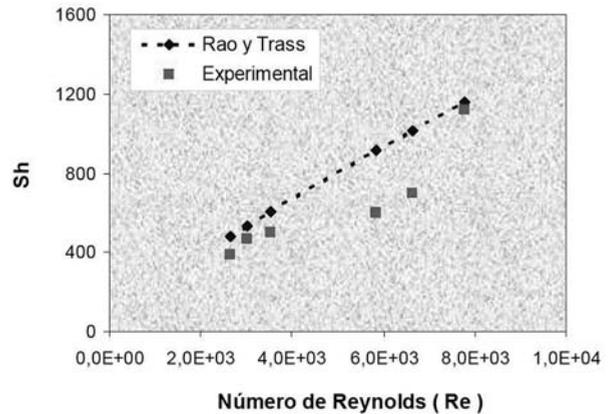
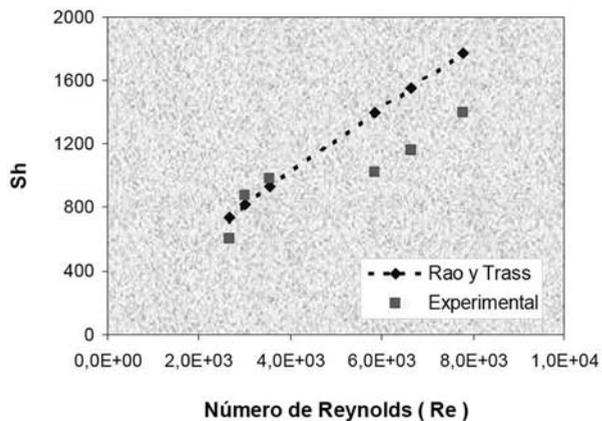


Figura 8. Comparación de los datos experimentales con la correlación de Rao y Trass, (a) r/r<sub>0</sub> = 2 (b) r/r<sub>0</sub> = 3.

Para el caso del esfuerzo de corte los resultados obtenidos mostraron un buen ajuste a bajas velocidades de flujo en la boquilla, pero al aumentar el Número de Reynolds se produjo un alejamiento significativo. Este resultado confirma la ausencia de un control total por transferencia de masa, el cual es asumido por la correlación que relaciona el esfuerzo de corte con la transferencia de masa. Ver Figura 9.

**Correlación Experimental.**

Los datos de la regresión lineal múltiple fueron analizados teniendo en cuenta el factor de correlación (R<sup>2</sup>), el cual indica el porcentaje de ajuste del modelo, y el valor de probabilidad (P) del análisis de varianza (ANOVA). Un valor de P inferior a 0,10 indica que existe una relación estadística entre las variables en un nivel de confianza del 90%. Valores menores a 0,05 muestran una relación estadística entre las variables en un nivel de confianza del 95%. En este estudio el factor de correlación fue de 94,29.

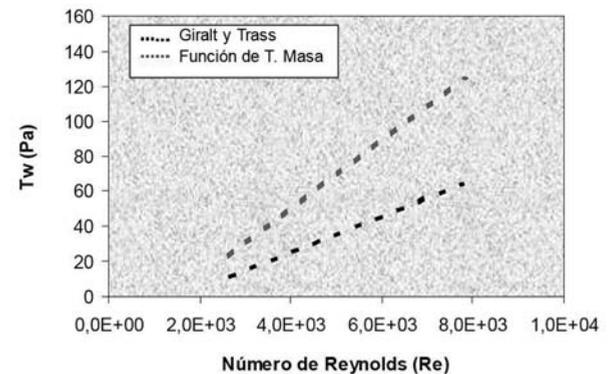


Figura 9. Relación entre los esfuerzos de corte a partir de los valores de transferencia de masa y el ajuste lineal de la correlación de Giralt y Trass.

$$VC = 150,33 + 1,05758E6K - 2,21299 \tau_w - 15,4734 T + 38,9203 R \quad (1)$$

Donde:

VC = Velocidad de corrosión

K = Coeficiente de transferencia de masa

$\tau_w$  = Esfuerzo de corte en la pared

T = Temperatura

R = Posición radial ( $r/r_o$ ) para la celda de impacto

## CONCLUSIONES

Se evidenció un cambio en la dependencia de la velocidad de corrosión con la velocidad del flujo, lo cual indica un cambio en el mecanismo de corrosión, descartando un control total por difusión y planteando la presencia de un control mixto sobre la reacción de corrosión del sistema en estudio.

Las correlaciones que mejor se ajustaron a este estudio fueron, para el caso de transferencia de masa, las correlaciones de Rao y Trass principalmente a bajos números de Reynolds. En el caso del esfuerzo de corte en la pared, la correlación de Giralt y Trass fue la más apropiada.

Se obtuvo una correlación con un ajuste aceptable que permite predecir la velocidad de corrosión, teniendo en cuenta parámetros como el coeficiente de transferencia de masa y esfuerzo de corte en la pared para el sistema acero al carbono AISI 1020 – oxígeno – agua y cloruro de sodio.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al ICP y al Grupo de Investigaciones en Corrosión de la Universidad Industrial de Santander, por su aporte técnico y de discusión científica.

## REFERENCIAS

- [1] POSTLETHWAITE, J. (1991) Direct measurement of the corrosion current for oxygen - reduction corrosion. *Electrochemical Corrosion Testing*. ASTM STP 727.
- [2] TROMANS, D. (1999) Modeling oxygen controlled corrosion of steels in hot water. *Corrosion*. Vol. 55, No10, p. 942-947.
- [3] LLEVBARE, G. and SCULLY J. (2001) Mass transport limited oxygen reducing reaction on AL 2024-T3 and selected intermetallic compounds in chromate containing solutions. *Corrosion*. Vol. 57, No 2, p. 134-152.
- [4] SONG, F., KIRK D., GRAYDON J. and CORMACK D. (2002) Effect of ferrous ion oxidation on corrosion of active iron under an aerated solution layer. *Corrosion*. Vol. 58, No 2, p. 145-155.
- [5] EFIRD K. D., WRIGHT E. J., BOROS J. A. and HAILEY T. G. (1993) Experimental correlation of steel corrosion in pipe flow with jet impingement and rotating cylinder laboratory tests. *Corrosion*. Vol. 49, No 12, p. 992-1003.
- [6] EFIRD K. (2000) Jet impingement testing for flow accelerated corrosion. *Corrosion*, Paper No. 52.
- [7] SILVERMAN D. (1990) An approach for predicting velocity sensitive corrosion. *Corrosion*. Paper No. 13.
- [8] HEITZ E. (1991) Chemo-Mechanical effects of flow on corrosion. *Corrosion*, Vol. 47, No 2, p. 135-145.
- [9] LANGSHOLT M., NORDSVEEN M. and LUNDE K. (1997) Wall shear stress and mass transfer rates important parameters in CO<sub>2</sub> corrosion. *BHR Group Multiphase*, p. 537-552.
- [10] GIRALT F. and TRASS O. (1975) Mass transfer from crystalline surfaces in a turbulent impinging jet part I transfer by erosion. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. Vol. 53, No 10, p. 505-511.
- [11] GIRALT F. and TRASS O. (1975) Mass transfer from crystalline surfaces in a turbulent impinging jet part II erosion and diffusional transfer. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. Vol. 54, No 6, p. 148-155.

- [12]ESTEBAN J., HICKEY G. and ORAZEM M. (1990) The Impinging Jet electrode: Measurement of the Hydrodynamic Constant and Its Use for Evaluating Film Persistency. *Corrosion* Vol. 46 No 11, p. 896-901.
- [13]ASTM G1-03. (2003). Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens.
- [14]DEMOZ A. and DABROS T. (2008). Relationship between shear stress on the walls of a pipe and an impinging jet. *Corrosion Science*. Vol.50. p. 3241–3246.
- [15]ORAZEM M., CARDOSO J., TRIBOLLET B. (2001). Application of a submerged impinging jet for corrosion studies: development of models for the impedance response. *Electrochimica Acta*. Vol.46. p. 3685–3698
- [16]MARTÍNEZ S. AND METIKOS-HUKOVIC. (2006). The inhibition of copper–nickel alloy corrosion under controlled hydrodynamic condition in seawater. *Journal of Applied Electrochemistry*. Vol. 36. p.1311–1315.