

## Capítulo V

### Prueba de Corrosión

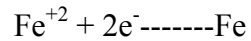
La corrosión se puede definir como un proceso destructivo que ocasiona un deterioro en el material como resultado de un ataque químico provocado por el medio ambiente [ 9 ]. La forma más común en la que se presenta la corrosión en los metales es por medio de un ataque electroquímico, esto se debe a que los metales cuentan con electrones libres que forman celdas electroquímicas, ocasionando que en cualquier momento se lleve a cabo una reacción química. Los materiales no metálicos como los polímeros y las cerámicas, no sufren de corrosión por ataque electroquímico, pero pueden presentar corrosión debido a ataques químicos directos, por ejemplo, las cerámicas pueden ser atacadas químicamente a temperaturas elevadas por sales fundidas, los polímeros pueden ser atacados químicamente por solventes orgánicos.

Ya que la forma más común en la que se genera la corrosión es por medio de una reacción electroquímica, es importante entender los principales puntos de esta reacción [6].

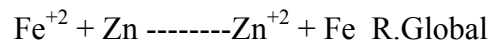
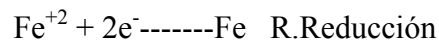
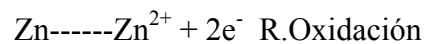
1.- **Reacción de Oxidación** (Reacción Anódica): La reacción de oxidación consiste en producir electrones a partir de un metal que tiene electrones libres. Por ejemplo:



2.- **Reacción de Reducción** (Reacción Catódica): La reacción de reducción consiste en el consumo de los electrones generados en la reacción de oxidación. Por ejemplo:



3.- **Reacción Global**: La reacción de oxidación que es en la cual se generan electrones y la reacción de reducción que es en la cual se consumen, deben de ocurrir al mismo tiempo y al mismo nivel para que se lleve a cabo la reacción electroquímica . Por ejemplo:



Debido a que la corrosión es el resultado de una reacción química, existen diversas condiciones que afectan la cantidad de corrosión que adquiere un elemento, entre estas condiciones se encuentran: la temperatura, el tipo de ambiente, los esfuerzos a los que esta sometido el elemento y la erosión. Es por esto que hoy en día la Ingeniería tiene como uno de sus propósitos principales controlar y prevenir la corrosión.

La corrosión se puede presentar de diferentes formas en el material, es por esto que a continuación se presenta una clasificación de acuerdo a la apariencia que tiene sobre el material, además se da una breve explicación de cada una de ellas y algunas formas en las que puede prevenirse [ 6 ].

- a) *Corrosión por Ataque Uniforme*: Este se caracteriza debido a que se presenta como resultado de una reacción electroquímica o química en toda la superficie del material, que ha sido expuesta a un ambiente corrosivo. Este tipo de ataque representa el mayor problema de corrosión que presentan los metales (en especial los aceros), pero es relativamente fácil de controlar. Algunas de las recomendaciones para prevenir este tipo de corrosión son: utilizar recubrimientos protectivos, además de poder usar protección catódica.
- b) *Corrosión Galvánica (corrosión de dos metales)*: Esta corrosión se presenta debido a que dos metales en contacto con diferente potencial electroquímico son expuestos a un medio ambiente corrosivo. Esto se debe principalmente a la relación entre el área del ánodo y del cátodo (Ánodo: Es aquel electrodo que en una celda electrolítica se disuelve en forma de iones y genera electrones a un circuito externo. Cátodo: Es aquel electrodo que en una celda electrolítica acepta electrones). Si la relación del área del ánodo es muy grande en relación al área del cátodo, se presentara un ataque corrosivo rápidamente, por lo contrario si la relación del área del ánodo es pequeña en relación al área del cátodo, el ataque corrosivo se presentara de forma lenta. Una de las formas más sencillas de prevenir este tipo de corrosión es utilizando un aislante entre las superficies de los metales que se encuentran en contacto.
- c) *Corrosión por Picaduras*: Este tipo de corrosión, se encuentra en áreas específicas, esto es que al ataque se presenta solo en ciertas zonas del material y produce hoyos o picaduras. Una de las principales causas por las que se presenta

esta corrosión es que muchos de los materiales no son homogéneos en toda su superficie, lo que causa que ciertas zonas estén propensas a ser atacadas. Este tipo de corrosión es difícil de detectar, ya que en muchas ocasiones las picaduras que presenta el material son muy pequeñas lo que ocasiona que el problema tienda a agrandarse en la mayoría de los casos. Para prevenir este tipo de corrosión se recomienda usar recubrimientos además de utilizar materiales más resistentes a la corrosión.

- d) *Corrosión por Hendiduras*: La corrosión por hendiduras es un tipo de corrosión electroquímica localizada que ocurre en aquellos espacios (hendiduras) que se forman al unir dos materiales, de igual forma se presentan en lugares donde se estanque algún tipo de solución o líquido. Un claro ejemplo de este tipo de corrosión se observa al unir dos placas de diferente material por medio de tornillos, el ataque surgirá efecto en el espacio que quede entre el tornillo y la placa y en aquellos lugares en donde las dos placas no estén en total contacto una con otra. Para prevenir este tipo de corrosión se recomienda: Usar soldadura en lugar de atornillar, eliminar el estancamiento de cualquier tipo de sustancia.
- e) *Corrosión Ínter granular*: La corrosión ínter granular es un tipo de corrosión localizada que ocurre en las fronteras de grano del material. En condiciones normales, si un metal sufre de corrosión uniforme, las fronteras de grano solo serán un poco más reactivas que la matriz, pero bajo otras condiciones, las fronteras de grano pueden ser muy reactivas, lo que resultaría en una corrosión ínter granular que traería como consecuencias la pérdida de resistencia del

material e incluso la desintegración de las fronteras de grano. Este tipo de corrosión ocurre principalmente en aquellas aleaciones que en algún momento de un proceso al que sean sometidas, obtengan la oportunidad de formar carburos que precipiten en las fronteras de grano, la principal causa de esta precipitación es la temperatura. Para prevenir este tipo de corrosión se debe de tener cuidado en los procesos que requieran de un cambio de temperatura.

- f) *Corrosión por Esfuerzo*: Este tipo de corrosión se presenta cuando el material está sometido a cierto esfuerzo en un ambiente corrosivo, lo que ocasiona que el material se rompa o se fracture. Una vez que aparece este tipo de corrosión las únicas formas de prevenirla es degradando los esfuerzos sobre el material, controlando las condiciones del ambiente o aplicar una protección catódica.
  
- g) *Corrosión por Erosión*: Esta se puede definir como la aceleración que presenta el proceso de corrosión en un material debido a una sustancia corrosiva en movimiento sobre el material. La corrosión por erosión se puede detectar debido a deformaciones sobre la superficie del material que está en contacto con el fluido corrosivo en movimiento, tales como picaduras, hoyos, abultamientos, las cuales ocurren generalmente en la dirección a la que fluye la sustancia corrosiva.
  
- h) *Corrosión por Ataque Selectivo*: Este tipo de corrosión tiene como principal característica, que solo uno de los elementos que forman la aleación es atacado preferencialmente. Algunas de las características con las que se pueden observar este tipo de corrosión son: Cambio de color de la aleación, se presenta porosidad

y en algunas ocasiones se empieza a picar. La protección catódica se recomienda para prevenir la corrosión por ataque selectivo.

Como se puede observar, la resistencia a la corrosión es una de las características más importante con las que debe contar un material. Cuando este tipo de material es utilizado como biomaterial, es aun más grande la importancia que tiene esta característica, ya que se podrían generar grandes daños si el elemento sufriera de algún tipo de corrosión dentro del cuerpo humano. Es por esto, que a continuación se realiza un análisis de las características con las que cuentan el Acero Inoxidable 316LS y el Titanio.

### ***Acero Inoxidable 316LS***

El acero inoxidable, es probablemente el material más utilizado en la actualidad para la construcción de elementos que requieren de resistencia a la corrosión, además que durante muchos años fue el único material que contara con esta característica.

Para esta investigación, nos enfocaremos en los Aceros Inoxidables Austeníticos, que son los que pertenecen a la serie 300 de la norma AISI (American Iron Steel Institute), este grupo de Acero Inoxidable contiene entre 16 y 26% de Cromo y de 6 a 22% de Níquel en su composición química, además de minimizar el Carbón a 0.08%. La variación en las cantidades de estos elementos, se debe a las diferentes aplicaciones que se le da al material [ 9 ].

El Acero Inoxidable Austenítico, cuenta con una muy buena resistencia a la corrosión, debido a que depende de una película de óxido que se forma en la superficie de la aleación. Esta película de óxido se puede ver afectada debido a un proceso de reducción o si se expone a chloride ions, lo que ocasionaría un ataque corrosivo de una forma muy rápida. De igual forma la combinación de Chloride Ions con un esfuerzo de tensión provocaría lo que conocemos con el nombre de Ruptura esfuerzo-corrosión. Es por esto, que hoy en día el acero inoxidable 316LS tiene una gran aplicación en el área Biomédica, ya que se ha logrado reducir al máximo el riesgo de corrosión en este material [ 4 ].

### *Aleaciones de Titanio*

El titanio es uno de los metales más abundantes en la tierra, al igual que el cromo, el níquel y el cobre, el titanio se utiliza en aleaciones que requieren de una muy buena resistencia a la corrosión. Sin embargo y a pesar de las características con las que cuenta el titanio (Dureza, Resistencia a la corrosión, Liviano, entre otras) su implementación en la industria es relativamente nueva.

Para el desarrollo de esta investigación, analizaremos las aleaciones **Ti-6Al-4V<sup>a</sup>** **ASTM grado 5**, la cual cuenta con la siguiente composición química: 0.05% máx. de Nitrógeno, 0.10% máx. de Carbón, 0.015% máx. de Hidrógeno, 0.40% máx. de Hierro, 0.20% máx. de Oxígeno, 5.5-6.75% de Aluminio, y 3.5-4.5 de Vanadio. Este tipo de aleación como ya se mencionó, es de gran importancia dentro del área Biomédica, las características con las que cuenta hacen que sea considerado como uno de los Biomateriales más importantes en la actualidad [ 9 ].

Una de las características más importantes con las que cuenta el Titanio Ti-6Al-4V<sup>a</sup> ASTM grado 5 es su excelente resistencia a la corrosión, este se debe principalmente a una película de oxido que se forma de manera instantánea en la superficie de la aleación una vez que se expone a un ambiente húmedo o con aire, esta película de oxido además de ser muy delgada es casi invisible y es muy estable, además ofrece una muy buena resistencia a casi cualquier tipo de sustancia. El Titanio tiene la características de poder restaurar cualquier ruptura que sufra esta película de oxido en forma casi inmediata en cualquier medio ambiente donde se encuentre expuesto a la humedad o al oxígeno [ 4 ].

### ***5.1 Técnicas para evaluar la Corrosión***

Se ha demostrado que la mejor forma de evaluar la resistencia a la corrosión con la que cuenta un elemento, es aquella en la que se expone a su ambiente de trabajo y después de un tiempo se evalúa la cantidad de corrosión que se genera. Desgraciadamente, este tipo de prueba no se utiliza ya que la inversión y el tiempo que se requiere es muy elevado, por lo tanto, se han generado diversos tipos de pruebas que requieren dependiendo de la prueba, una menor inversión y un período de tiempo menor. Entre estas técnicas se encuentran las siguientes [ 10 ]:

- a) Cambio en las dimensiones de la pieza.
- b) Pérdida de peso en la pieza.
- c) Cantidad de resistencia eléctrica.
- d) Determinación de las características electroquímicas.



Para el desarrollo de esta investigación, la forma en la que la pieza pierde peso debido a la corrosión será nuestra técnica experimental, este tipo de prueba es la más utilizada en la actualidad debido a su gran eficacia y a la sencillez para realizarla. Esta técnica consiste en exponer la pieza en un ambiente de prueba por cierto período de tiempo y después evaluar la cantidad de material que se pierde por la corrosión. El tiempo que se expone la pieza, la pérdida de peso, el área de la pieza y la densidad del material, son los parámetros que se consideran para realizar esta prueba y obtener la cantidad de corrosión con la que cuenta la aleación.

Con el paso del tiempo, la forma de expresar la cantidad de corrosión que adquiere un elemento en un cierto período de tiempo se ha ido desarrollando, en la actualidad esta cantidad se expresa con las unidades **mpy (mils per year)** o en **mm/y (millimeters per year)** que expresan la cantidad de corrosión que penetra al material.

Para obtener estas unidades bajo el esquema de una prueba de corrosión por pérdida de peso se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{mpy} = \frac{\text{WL} * 22273}{\text{D} * \text{A} * \text{T}}$$

WL = Peso que pierde el material, en gramos (g).

D = Densidad del material, en gramos sobre centímetros cúbicos (g/cm<sup>3</sup>).

A = Área del material, en pulgadas cuadradas (in<sup>2</sup>).

T = Tiempo que se expone el material al ambiente corrosivo, en días.

## *5.2 Desarrollo Experimental*

Conociendo la importancia que tiene la resistencia a la corrosión de un material, las características con las que cuentan nuestras aleaciones y la forma en la que podemos calcular esta resistencia, analizaremos el comportamiento de las aleaciones bajo el esquema ya indicado.

El análisis se realizara bajo un ambiente corrosivo seleccionado de acuerdo a la funcionalidad que tienen el Acero Inoxidable 316LS y el Titanio (Ti-6Al-4V<sup>a</sup>). Este tipo de materiales como ya se ha mencionado tienen una función muy importante en el área Biomédica y en especial en la elaboración de elementos capaces de sustituir por un cierto período de tiempo la función que realiza algún elemento del cuerpo humano. Es por esto que se designaron dos tipos de ambientes corrosivos para estas aleaciones [ 11 ]:

- 1) Bajo condiciones de Agua Destilada.
- 2) Bajo condiciones de Cloruro de Sodio (3.5g de sal por cada 100ml de agua).

Estas consideraciones se deben a la gran cantidad de agua y de sales que existen en el cuerpo humano. Debido a la funcionalidad de las aleaciones y a la relación que mantienen con el cuerpo humano, se determino que el período de tiempo a evaluar será de 30 días bajo las condiciones ya mencionadas. Las piezas a evaluar contarán con un acabado de espejo para facilitar la inspección visual.

Se utilizaran vasos de precipitado de 100ml como contenedores de las piezas, las cuales se mantendrán totalmente sumergidas en las soluciones ya mencionadas, se realizara un análisis cada semana (7 días) durante 6 semanas. Este análisis constara en tomar el peso de la pieza para observar si ha sufrido algún cambio. Para pesar las piezas se utilizara una balcula analítica HUUS con exactitud de  $\pm 0.0002$  g.

### 5.3 Resultados

Para la entrega de resultados se realizo una clasificación de las piezas y de los ambientes corrosivos a los que estuvieron expuestos, a continuación se presenta esta clasificación y las condiciones iniciales de las piezas. La fecha en la que se inicio la prueba fue el 26 de Enero del 2004.

**Pieza # 1A:** Aleación de Acero Inoxidable 316LS sumergida en Cloruro de Sodio.

Área Inicial:  $0.4235\text{in}^2$ .

Peso Inicial: 6.0661g.

Densidad:  $7.95\text{g/cm}^3$ .

**Pieza # 2A:** Aleación de Acero Inoxidable 316LS sumergida en Agua Destilada.

Área Inicial:  $0.5189\text{in}^2$ .

Peso Inicial: 4.4511g.

Densidad: 7.95g/cm<sup>3</sup>.

**Pieza # 1T:** Aleación de Titanio Ti-6Al-4V<sup>a</sup> sumergida en Cloruro de Sodio.

Área Inicial: 0.3894 in<sup>2</sup>.

Peso Inicial: 2.6918g.

Densidad: 4.43g/cm<sup>3</sup>.

**Pieza # 2T:** Aleación de Titanio Ti-6Al-4V<sup>a</sup> sumergida en Agua Destilada.

Área Inicial: 0.3512in<sup>2</sup>.

Peso Inicial: 3.2861g.

Densidad: 4.43g/cm<sup>3</sup>.

En base a las condiciones iniciales de cada pieza, a continuación se presentan los resultados obtenidos en cada uno de los análisis realizados.

Primera observación (2 de Febrero del 2004)

Probeta 1A:

Peso: 6.0653g.

Peso Perdido: 0.0008g.

mpy: 0.7560.

Probeta 2A:

Peso: 4.4510g.

Peso Perdido: 0.0001g.

mpy: 0.0771.

Probeta 1T:

Peso: 2.6915g.

Peso Perdido: 0.0003g.

mpy: 0.5533.

Probeta 2T:

Peso: 3.2858g.

Peso Perdido: 0.0003g.

mpy: 0.61354.

Segunda observación (9 de Febrero del 2004)

Probeta 1A:

Peso: 6.0650g.

Peso Perdido: 0.0011g.

mpy: 0.5197.

Probeta 2A:

Peso: 4.4508g.

Peso Perdido: 0.0003g

mpy: 0.1156.

Probeta 1T:

Peso: 2.6908g.

Peso Perdido: 0.001g.

mpy: 0.9222.

Probeta 2T:

Peso: 3.2851g.

Peso Perdido: 0.001g.

mpy: 1.0225.

Tercera observación (16 de Febrero del 2004)

Probeta 1A:

Peso: 6.0627g.

Peso Perdido: 0.0034g.

mpy: 1.071.

Probeta 2A:

Peso: 4.4505g.

Peso Perdido: 0.0006g

mpy: 0.1542.

Probeta 1T:

Peso: 2.6902g.

Peso Perdido: 0.0016g.

mpy: 0.9837.

Probeta 2T:

Peso: 3.2845g.

Peso Perdido: 0.0016g.

mpy: 1.0907.

Cuarta observación (23 de Febrero del 2004)

Probeta 1A:

Peso: 6.0610g.

Peso Perdido: 0.0051g.

mpy: 1.204.

Probeta 2A:

Peso: 4.4493g.

Peso Perdido: 0.0018g

mpy: 0.3470.

Probeta 1T:

Peso: 2.6892g.

Peso Perdido: 0.0026g.

mpy: 1.1989

Probeta 2T:

Peso: 3.2829g.

Peso Perdido: 0.0038g.

mpy: 1.9428.

Quinta observación (1 de Marzo del 2004)

Probeta 1A:

Peso: 6.0609g.

Peso Perdido: 0.0052g.



mpy: 0.9828.

Probeta 2A:

Peso: 4.4492g.

Peso Perdido: 0.0019g

mpy: 0.2930.

Probeta 1T:

Peso: 2.6887g.

Peso Perdido: 0.0031g.

mpy: 1.1435.

Probeta 2T:

Peso: 3.2828g.

Peso Perdido: 0.0039g.

mpy: 1.5952.

Sexta observación (8 de Marzo del 2004)

Probeta 1A:

Peso: 6.0606g.

Peso Perdido: 0.0055g.

mpy: 0.8663.

Probeta 2A:

Peso: 4.4491g.

Peso Perdido: 0.0020g

mpy: 0.2571.

Probeta 1T:

Peso: 2.6885g.

Peso Perdido: 0.0033g.

mpy: 1.0144.

Probeta 2T:

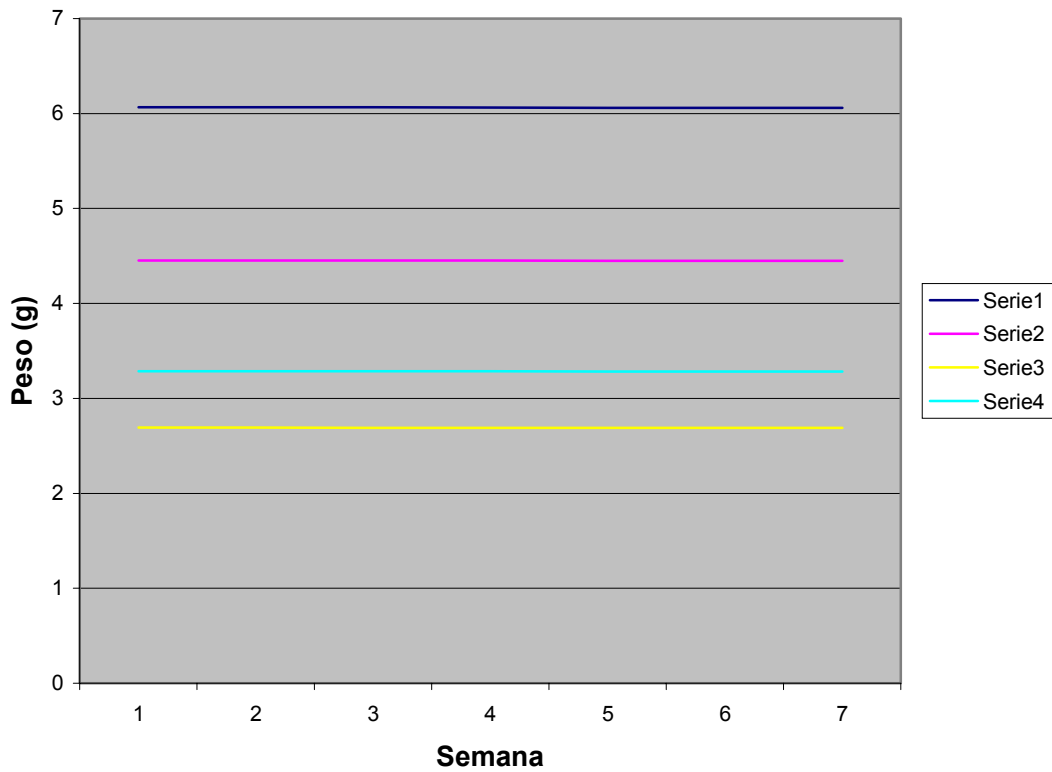
Peso: 3.2825g.

Peso Perdido: 0.0042g.

mpy: 1.4315.

A continuación se muestran dos gráficas en las que observaremos el comportamiento de las muestras durante el tiempo que se evaluaron.

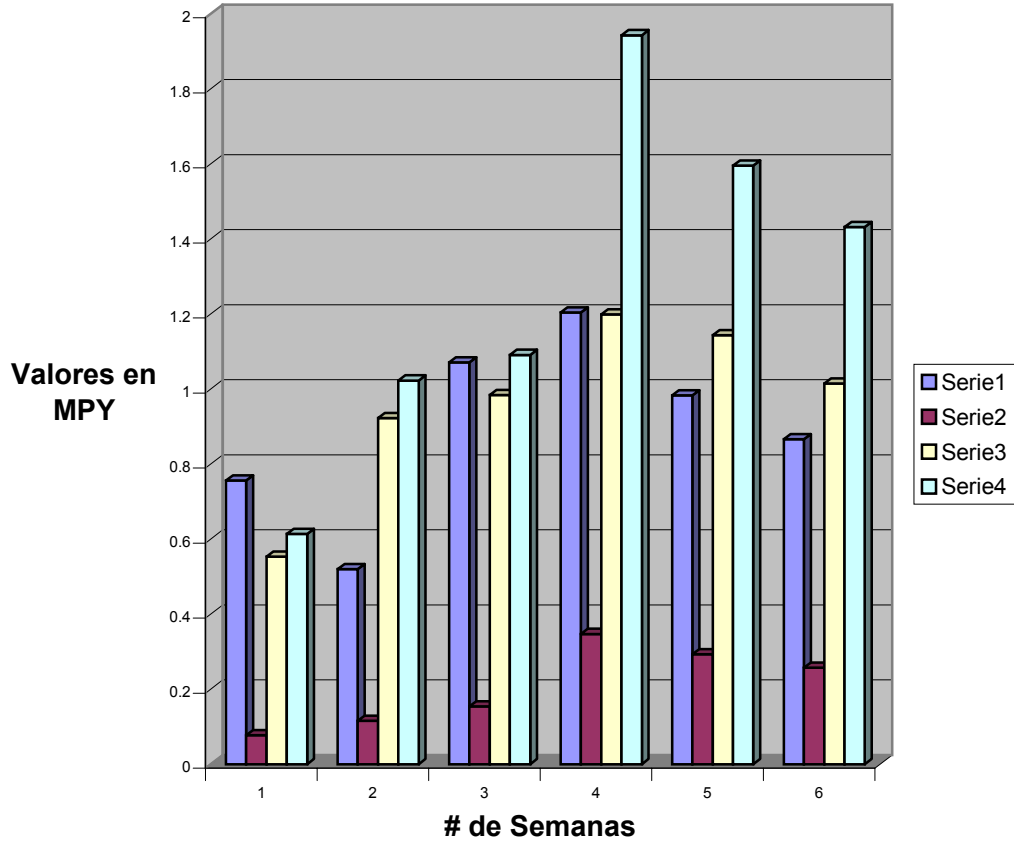
### Prueba de Corrosión (Perdida de peso g)



**Figura 5.1** Gráfica de Corrosión por Perdida de Peso.

En esta gráfica se observa la forma en la que las probetas variaron su peso, como se observa el peso que perdieron fue mínimo. La serie uno muestra el comportamiento de la probeta 1A, la serie 2 la de la probeta 2A, la serie 3 la de la probeta 1T y la serie 4 la de la probeta 2T.

### Graficá de Corrosión (MPY)



**Figura 5.2** Gráfica de Corrosión MPY.

En esta gráfica se observa la cantidad de corrosión que presentaron las probetas en cada semana, las dimensiones de esta cantidad son mpy (mills per year). La serie uno muestra el comportamiento de la probeta 1A, la serie 2 la de la probeta 2A, la serie 3 la de la probeta 1T y la serie 4 la de la probeta 2T.