

## Introducción

La técnica de Resistencia Eléctrica (ER) es un método “en línea” o “en caliente” para el monitoreo de la tasa de corrosión y la magnitud de la pérdida total de metal de cualquier equipo o estructura metálica. La técnica ER mide los efectos electroquímicos de la corrosión como los efectos mecánicos de la erosión. Este es el único método instrumental “en línea” aplicable para cualquier tipo de ambiente o medio corrosivo.

Además de ser universalmente aplicable, el método ER es el único apto para medios bajos o nulos en conductividad electrolítica, como lo son los vapores, gases, sólidos, hidrocarburos, y líquidos no acuosos. Como ejemplo de situaciones donde la tecnología ER es totalmente utilizable son:

- ✓ Sistemas de producción y transporte de gas y crudo.
- ✓ Instalaciones de refinerías y petroquímicas
- ✓ Líneas enterradas o expuestas.
- ✓ Sistemas de manejo de agua.
- ✓ Estructuras arquitectónicas

Un sistema de monitoreo ER consiste en un instrumento conectado a una probeta. El instrumento puede estar permanentemente instalado para proveer una información continua, o puede ser portátil para tomar información periódicamente de un número de locaciones. La probeta está equipada con un elemento sensor de una material con una composición similar a la de la estructura que se quiere estudiar.

## PRINCIPIO DE OPERACIÓN

La resistencia eléctrica de un elemento de metal o aleación está dada por:

$$R = r \cdot L / A$$

R = Resistencia eléctrica del elemento  
L = Longitud del elemento  
A = Área del corte transversal  
r = Resistencia específica del material



La reducción o pérdida de metal en el corte transversal del elemento típico de la corrosión, viene acompañada de un proporcional incremento de la resistencia eléctrica del elemento.

Las mediciones prácticas hechas usando las probetas ER equipadas con un elemento sensor que es libremente expuesto a un fluido corrosivo, y un elemento de referencia sellado dentro del cuerpo de la probeta.

Las mediciones de la diferencia entre el elemento expuesto y el de referencia son mostradas en la siguiente figura.

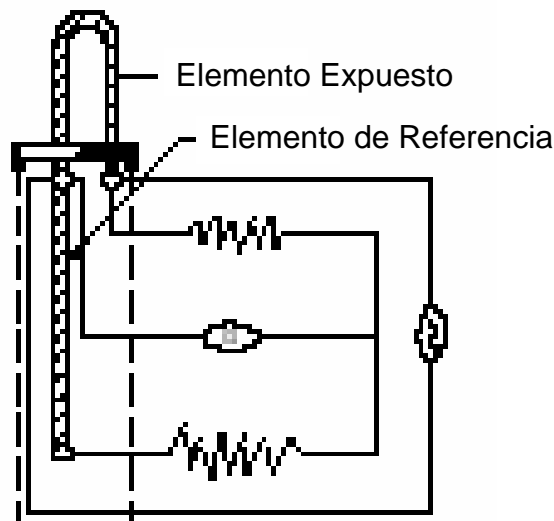


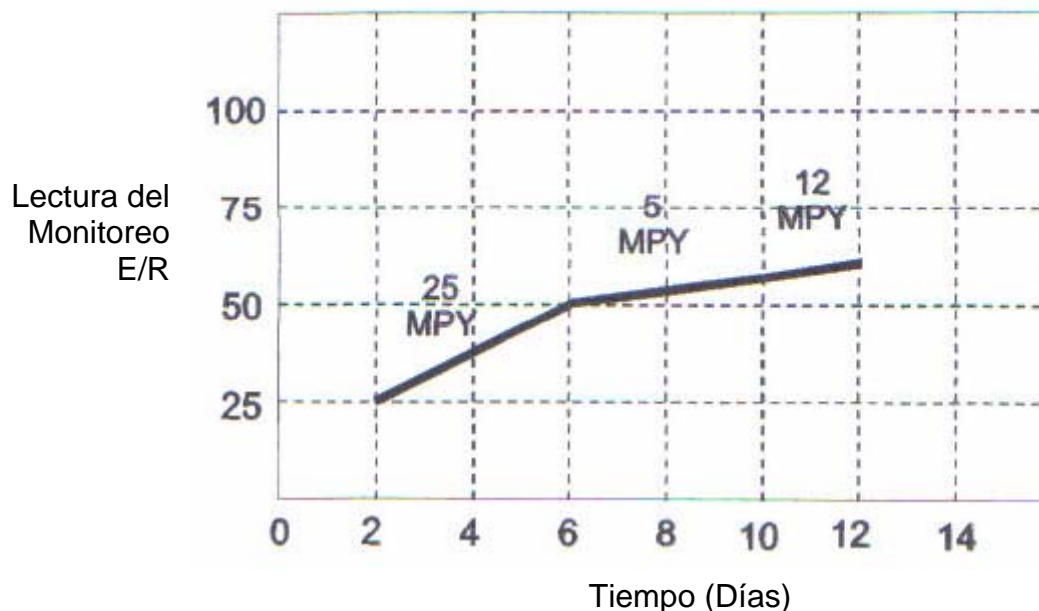
Fig. 1 Probeta / Instrumento

Debido a que los cambios de temperatura afectan de igual forma tanto al elemento metálico expuesto y al de referencia, el uso de esta diferencia minimiza la influencia de los cambios de la temperatura ambiente en las lecturas tomadas

Sin embargo, cualquier cambio neto en el diferencial de resistencia es únicamente atribuible a las pérdidas de metal del elemento expuesto, una vez que el equilibrio térmico sea establecido.

Todas las probetas ER de Metal Samples incorporan un tercer elemento llamado el elemento de confirmación. Debido a que este elemento también es sellado dentro del cuerpo de la probeta, el diferencial entre su resistencia y la del elemento de referencia mantiene incambiable, Cualquier cambio significativo en este diferencial, indica un daño en la integridad de la probeta.

Las mediciones de las probetas ER pueden ser tomadas tanto periódicamente usando un instrumento portátil, como de forma continua, utilizando una unidad permanentemente instalada. En cualquiera de los casos, los instrumentos Metal Samples producirán una señal lineal la cual es proporcional a la pérdida de metal del elemento expuesto. La tasa de cambio en la salida del instrumento es una medida de la tasa de corrosión. La data de un monitoreo continuo es usualmente transmitido a una computadora / data – logger y tratada para proporcionar una información directa de la tasa de corrosión. Existen técnicas gráficas manuales que pueden ser usadas para derivar la tasa de corrosión de los datos obtenidos de forma periódica, tal y como muestra la figura siguiente.



## ELEMENTOS SENSORES ER

Los elementos sensores se encuentran disponibles en una variedad de configuraciones geométricas, espesores y aleaciones. Los tipos de elementos disponibles son mostrados en la siguiente figura.

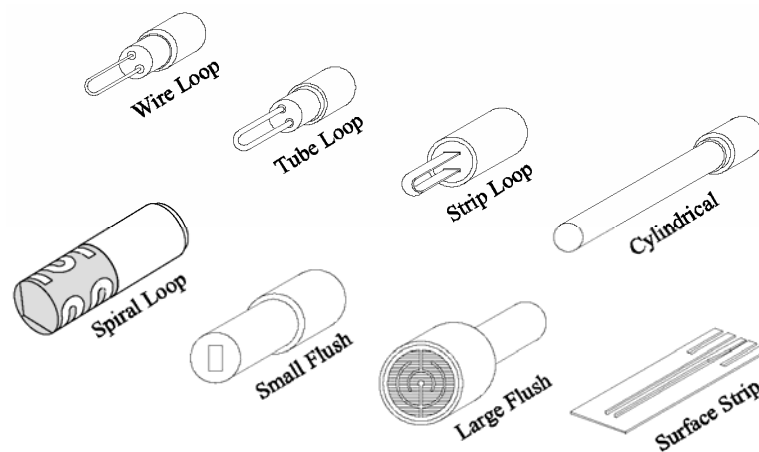


Figura 3. Elementos Sensores

**Wire Loop:** Estos elementos son los más comunes disponibles. Este tipo de elemento tiene una alta sensibilidad y baja susceptibilidad al ruido del sistema, haciéndolo una buena elección para la mayoría de las instalaciones.

Los elementos tipo “alambre” o Wire Loop son generalmente fijados de forma sellada en el terminal de la probeta con vidrio, para luego ser soldado al cuerpo de la probeta. Este sello es químicamente inerte en la mayoría de los ambientes y tiene una buena resistencia a la presión y temperatura, haciéndola una buena selección para la mayoría de las aplicaciones. Las aleaciones comúnmente selladas con vidrio son el Acero al Carbono y los Acero Inoxidable 304 y 316 AISI. Donde el vidrio puede ser susceptible a problemas de corrosión, los sellos de Teflón también son disponibles.

Las probetas con el elemento “wire loop” están normalmente equipados con un deflector de flujo o camisa para la velocidad, para proteger al elemento de partículas flotantes en la tubería del sistema, y para garantizar que la pérdida del metal ocurra por efectos de la corrosión y no de la erosión del medio. Se recomienda su uso para aplicaciones en fluidos a velocidades mayores a 20 pies / segundos.

**Tube Loop:** Los elementos tipo alambre de tubo o “Tube Loop” son recomendados donde la alta sensibilidad sea requerida para detectar rápidamente las bajas tasas de corrosión. Los elementos “Tube Loop” son fabricados en semejanza geométrica a los “Wire Loop”, pero hechos no con un alambre sólido, si no hueco. El Acero al Carbono es la aleación más comúnmente utilidad. Los alambres de tubo también se encuentran disponibles en un sello de Teflón. Las probetas que utilizan este tipo de elemento sensor pueden ser equipados con un deflector de flujo o camisa protectora para minimizar la posible distorsión producida en sistema de rápido flujo.

**Strip Loop:** Estos elementos son similares geométricamente a los de alambre o tubo (“Wire Loop” o “Tube Loop”), pero son planos. Pueden estar sellados por vidrio o epóxico dentro del terminal dependiendo de la aplicación requerida. Este elemento es muy sensible. Son sumamente frágiles y deben ser considerados sólo para usarlos en flujos muy lentos.

**Cilíndrico:** Estas probetas son fabricadas soldando el tubo metálico de referencia dentro del tubo elemento. Este elemento tiene una construcción totalmente soldada, y a su vez es soldado a la probeta. Es por ello que puede fabricarse de una gran variedad de aleaciones. Esta probeta es ideal para se localizada en los ambientes agresivamente corrosivos, incluyendo los sistemas de alta velocidad y temperatura, o cualquier otro donde los sellos de vidrio o Teflón no son aplicables.

**Spiral Loop:** Los elementos sensores de esta probeta consisten en una lámina delgada de metal formada en una base inerte. El elemento es particularmente rugoso e ideal para medios de flujo rápido. Su resistencia comparativamente alta produce una señal ante el ruido, lo cual lo hace un elemento muy sensible.



**Flush Mount:** Este elemento está diseñado para ser colocado razante a la pared de la tubería o contenedor. Este elemento es muy efectivo para simular la real condición corrosiva a lo largo de superficie interna de la pared de la tubería. Siendo razante, este elemento no está expuesto a daños causados por una alta velocidad de flujo, y puede ser utilizada en líneas sujetas a operaciones con “cochino”.

**Surface Strip:** Este elemento es de forma rectangular y delgada, con un área superficial comparativamente grande, que permite obtener resultados más representativos en ambientes corrosivos no homogéneos. Este elemento laminar es comúnmente usado en probetas bajo tierra para monitorear la efectividad de la corriente de protección catódica aplicada a la superficie externa de estructuras enterradas.

## CALCULO DE LA TASA DE CORROSIÓN

Quando se realiza la medición con la probeta de Resistencia Eléctrica, el instrumento produce una señal linealizada que es proporcional a la pérdida total de metal del elemento expuesto (M). El valor numérico real sería una función del espesor del elemento y su geometría. En el cálculo de la pérdida de metal (M), esos factores geométricos y dimensionales están incorporados en el factor multiplicador específico de la probeta (P), y la pérdida de metal es dada por:

$$M = \frac{S \cdot P}{1000}$$

Tanto S y P son las pérdidas de cada dimensión. La pérdida de espesor es convencionalmente expresado en mils (0.001 pulgadas), así como el espesor del elemento. La tasa de corrosión (C) es derivada de:

$$C = \frac{P \cdot 365 \cdot (S_2 - S_1)}{\Delta T \cdot 1000}$$

Donde  $\Delta T$  es el lapso de tiempo en días entre la lecturas del instrumento S1 y S2.

La tabla siguiente lista los tipos de elementos, espesores, vida útil y número de identificación. Para máximas presiones y temperaturas de diseño se debe revisar las respectivas hojas técnicas. Cuando se seleccionen un elemento para una determinada aplicación, los parámetros clave a considerar (aparte de los rangos fundamentales de temperatura y presión), para la obtención de óptimos resultados son el tiempo de respuesta y la vida útil de la probeta. El espesor del elemento, su geometría y la estimación de la posible tasa de corrosión determina tanto el tiempo de respuesta como la vida útil de la probeta. El tiempo de respuesta, definido como el tiempo mínimo en el que algún cambio puede ser registrado, determina la rapidez con la que pueden ser obtenidos resultados útiles. La vida útil de la probeta, o tiempo que se requiere para que el espesor efectivo de su elemento sea consumido, determina el tiempo de reemplazo de la probeta.

Tipo de Elemento	Espesor	Vida útil	ID
Wire Loop	40 mil	10 mil	WR40
	80 mil	20 mil	WR80
Tube Loop	4 mil	2 mil	TU04
	8 mil	4 mil	TU08
	16 mil	8 mil	TU16
Strip Loop	4 mil	1 mil	SL04
	8 mil	2 mil	SL08
Cilíndrico	10 mil	5 mil	CT10
	20 mil	10 mil	CT20
	50 mil	25 mil	CT50
Spiral Loop	10 mil	5 mil	SP10
	20 mil	10 mil	SP20
Flush pequeño	4 mil	2 mil	FS04
	8 mil	4 mil	FS08
	20 mil	10 mil	FS20
Flush grande	5 mil	2.5 mil	FL05
	10 mil	5 mil	FL10
	20 mil	10 mil	FL20
	40 mil	20 mil	FL40
Superface Strip	10 mil	5 mil	SS10
	20 mil	10 mil	SS20
	40 mil	20 mil	SS40





Debido a que la vida de la probeta y el tiempo de respuesta son directamente proporcionales, la selección de un elemento obedece a un compromiso entre la frecuencia de toma de datos y la frecuencia de reemplazo de la probeta. El gráfico presentado a continuación, relaciona la tasa de corrosión, la vida útil y el tiempo de respuesta de todos los elementos normalmente disponibles por Metal Samples.

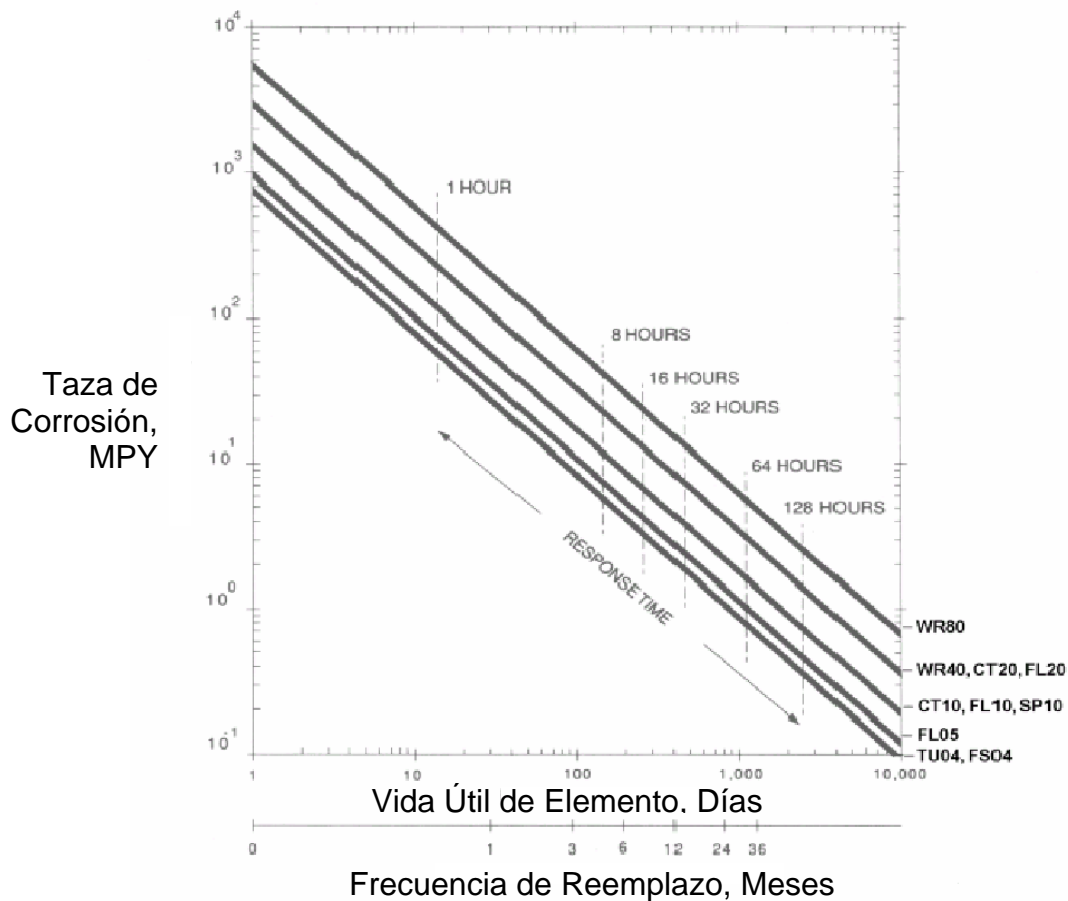
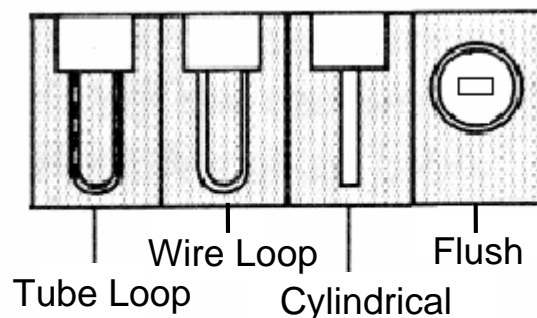


Figura 4. Guía de Selección de Elementos



## Elementos Sensores de las Probetas ER

Los elementos de la probeta de resistencia eléctrica son ofrecidos en una gran variedad de espesores y geometrías. Los más comunes están ilustrados en la siguiente figura.



Los elementos tipo alambre de tubo (Tube Loop) están contruidos con un tubo hueco de paredes delgadas. Su reducida sección transversal permite una respuesta rápida a la baja tasa de corrosión.

Los elementos tipo Wire Loop, contruidos con un alambre sólido, suministran un buen equilibrio entre sensibilidad y larga vida. Son típicamente usados para sistemas con una tasa de corrosión moderada (5-20 mpy).

Los elementos cilíndricos están fabricados a partir de un cilindro hueco y son extremadamente robustos. Ellos son usados ampliamente usados en altas temperaturas y condiciones de tasas de flujo. Ellos tienden a ser sensibles al ruido y algo lentos en suministrar repuesta. Consecuentemente, ellos son únicamente recomendados para tasa de corrosión de moderadas a altas (10-50 mpy).

Los elementos tipo Flush están diseñados para ser colocados de forma rasante con la superficie corroída de la tubería o contenedor de tal forma que pueda simular de forma idónea la tasa de corrosión. El elemento tipo Flush es útil en régimen de alto flujo y en condiciones operacionales donde la obstrucción interna no es permisible, por ejemplo, tuberías donde de emplean cochinos de inspección.

El mecanismo para sellar los elementos dentro del cuerpo de la probeta varía. Por ejemplo, los elementos cilíndricos están sellados con una soldadura metálica, mientras que los elementos tipo Flush están sellados con un sello epóxico.

El sello de los elementos es un factor primario en la determinación de la tasa de temperatura y presión en la probeta ER.

La siguiente tabla suministra una guía de limitaciones de temperatura y presión para varios de diseños de elementos.

Forma del Elemento	Espesor	Elemento ID	Temperatura Máx. °F/ °C
Tubular Loop Sello de vidrio	4 mil 8 mil	TU04 TU08	500 / 260
Wire Loop Sello de vidrio	40 mil 80 mil	WR40 WR80	500 / 260
Elemento Cilíndrico Soldado	10 mi 20 mil	CT10 CT20	500 / 260
Elemento Tipo Flush Sello Epóxico	5 mil 10 mil	FM5 FM10	400 / 204

Las limitaciones de temperatura y presión mostradas en la tabla pueden ser sujetas a modificación de acuerdo con el diseño del cuerpo de la probeta.

El último aspecto a considerar respecto a la sensibilidad de los elementos es el material de construcción. Generalmente, éste debe ser seleccionado de forma que se ajuste a los requerimientos de planta de la mejor forma posible, asemejando el material de la línea o contenedor.

Casi todas las configuraciones geométricas y espesores de los elementos pueden ser fabricados en cualquier aleación comercialmente disponible. Sin embargo, algunas aleaciones, particularmente en los sellos de vidrio pueden ser altamente costosas y tienen un considerable tiempo de entrega.

## TABLA DE SELECCIÓN DE ELEMENTOS Y ALEACIONES

Numero UNS	Tipo de Elemento	Wire Loops				Tube Loops				Strip Loops				Cilíndrico Soldado			Montaje Flush					
		WR40		WR80		TU04		TU08		SL04		SL08					Largo			Lámina		
	Vida en Mils		10		20		2		4		1		2		5	10	25	5	10	20	2	4
	Aleación del Elemento		T F E	G L A S S	T F E	G L A S S	T F E	G L A S S	T F E	G L A S S	T F E	G L A S S	T F E	G L A S S	C T 1 0	C T 2 0	C T 5 0	F M 1 0	F M 2 0	F M 4 0	F M 0 4	F M 0 8
G10100	C1010	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
K03005	A53	X		X											X	X						
K42544	5 Cr ½ mo	X		X										X	X	X						
K90941	9 Cr 1 mo	X	X	X										X	X	X						
S41000	410 S/S	X	X	X										X	X	X						
S30400	304 S/S	X	X	X						X		X		X	X							
S30403	304L S/S	X	X	X						X		X		X	X							
S316000	316 S/S	X	X	X		X	X	X	X	X		X		X	X							
S31603	316L	X	X	X		X	X	X	X	X		X		X	X							
S31703	317L S/S	X	X	X																		
NO8020	Alloy 20	X	X	X										X	X							
NO8904	904L S/S	X		X																		
N10665	Hastelloy B2 ® <sub>1</sub>	X	X	X										X	X							
N10276	Hastelloy C276® <sub>1</sub>	X		X										X	X	X						
N06022	Hastelloy C22® <sub>1</sub>	X		X										X	X							
NO6030	Hastelloy C30® <sub>1</sub>	X		X										X	X							
S32550	Ferrallium F255® <sub>1</sub>	X	X	X										X	X							
NO6617	Incoloy 617 ® <sub>2</sub>	X		X										X	X	X						
NO6625	Incoloy 625 ® <sub>2</sub>	X	X	X																		
NO8825	Incoloy 825 ® <sub>2</sub>	X		X																		
NO4400	Monel 400 ® <sub>2</sub>	X		X										X	X							
N/A	Sandvik 2RE10 ® <sub>3</sub>	X		X											X							
R50400	Titanium GR2	X		X						X		X			X		X			X		X
C12200	DHP Cu	X		X																		
C443000	Adm Brass	X		X																		
C68700	Al Brass	X		X																		
C70600	90/10 Cu Ni	X		X																		
C71500	70/30 Cu Ni	X		X																		

**Nota:** no todas las combinaciones de elementos y probetas son compatibles.

Marcas Registradas: ®<sub>1</sub> Haynes, ®<sub>2</sub> Inco, ®<sub>3</sub> Sandvik

## Selección del Elemento

Las probetas ER suministran el porcentaje de pérdida del espesor del metal y es una función del espesor original del elemento. Esencialmente, la pérdida total del metal y la tasa de corrosión están dadas por las siguientes funciones:

$$M_L = \frac{X \times K}{1000}$$

$$C_R = \frac{(X_2 \times X_1) \times K \times 365}{1000 t}$$

$M_L$  = Pérdida del metal en Mils

$X$  = Lectura del Instrumento en cualquier tiempo

$X_2$  = Lectura del Instrumento en el tiempo  $t_2$

$X_1$  = Lectura del Instrumento en el tiempo  $t_1$

$t$  = Lapso de Tiempo (Días) entre la lectura  $X_1$  y  $X_2$

$C_R$  = Tasa de corrosión en MPY (milésimas de pulgadas por año)

$K$  = Constante de la Probeta

La constante  $K$  de la probeta varía en función del espesor del elemento y su geometría. La siguiente tabla muestra el Factor  $K$  para varios elementos comunes.

Geometría del elemento	Factor K
TU04	2
TU08	4
WR40	10
WR80	20
CT10	5
CT20	10
FM5	2.5
FM10	5
FM20	10
FM40	20

Algunos de los más nuevos instrumentos particularmente el MS1500E, ejecutan un cálculo automático de la tasa de corrosión y pérdida del metal mostrando las lecturas directamente a través de su pantalla.

Las características claves para la selección de un particular elemento sensor son la vida útil y la respuesta en el tiempo. La vida del elemento es directamente proporcional a su espesor, mientras que la respuesta en el tiempo (el tiempo requerido para obtener un significativo cambio en la lectura a una tasa de corrosión dada) es inversamente proporcional al espesor del elemento.

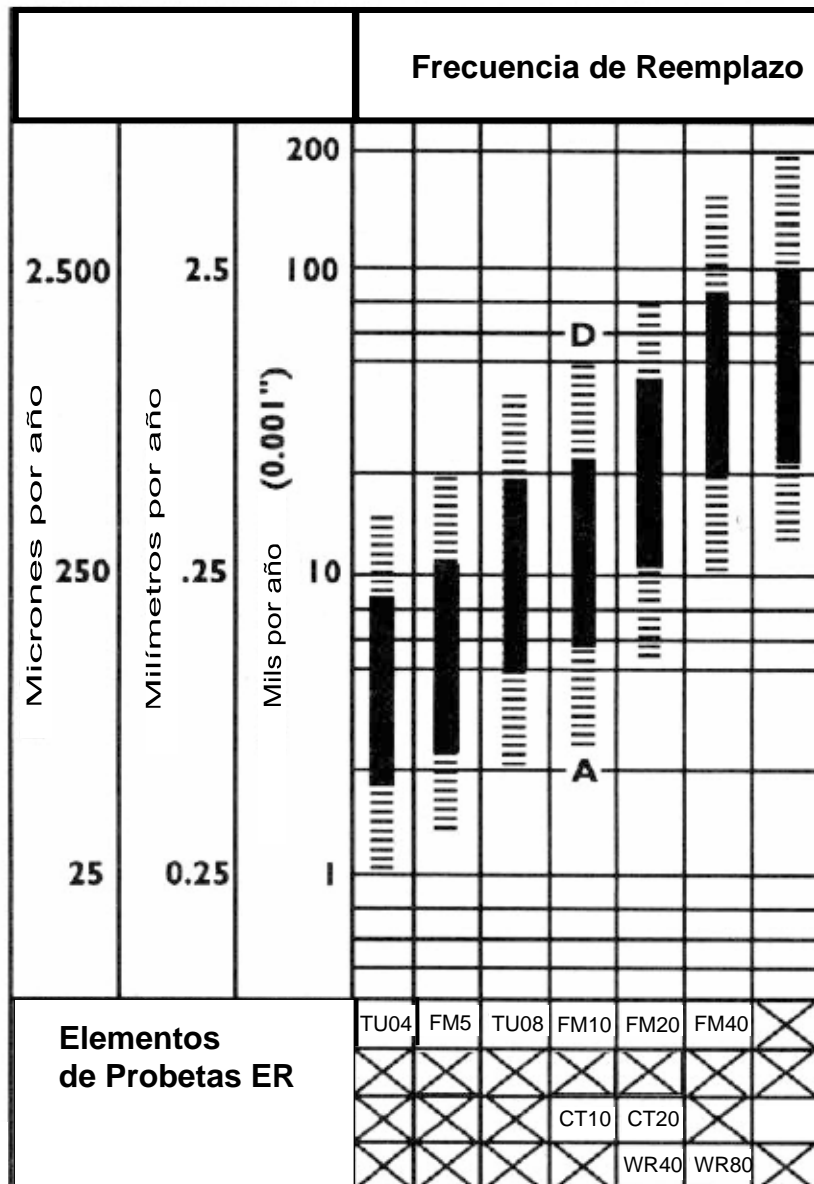
Así, el usuario debe lograr una compensación entre la vida útil de la probeta y su respuesta en el tiempo cuando selecciona un elemento sensor. Las siguientes figuras proveen una guía general para la selección óptima de una probeta considerando estas dos variables.

Otra característica importante relacionada con la geometría del elemento es la repetibilidad de la medición. Por debajo de las circunstancias ideales de repetibilidad el instrumento mostrará valores con un grado de repetibilidad de  $\pm 0.1\%$ , para la mayoría de las unidades comercialmente disponible.

Sin embargo, la baja resistencia de elemento (por ejemplo, CT20, WR80) en sistemas que exhiben una frecuencia de 30-60 ciclos por minuto, y fluctuaciones de temperatura relativamente grandes de entre  $\pm 10 - 15$  °F, solo pueden ser logrados una repetibilidad  $\pm 0.5\%$ . Tales elementos de baja resistencia deben ser evitados cuando existe inestabilidad de la temperatura, al menos que se espere una alta tasa de corrosión (más de 20 mpy).



## GUÍA DE SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS (VIDA DEL ELEMENTO)

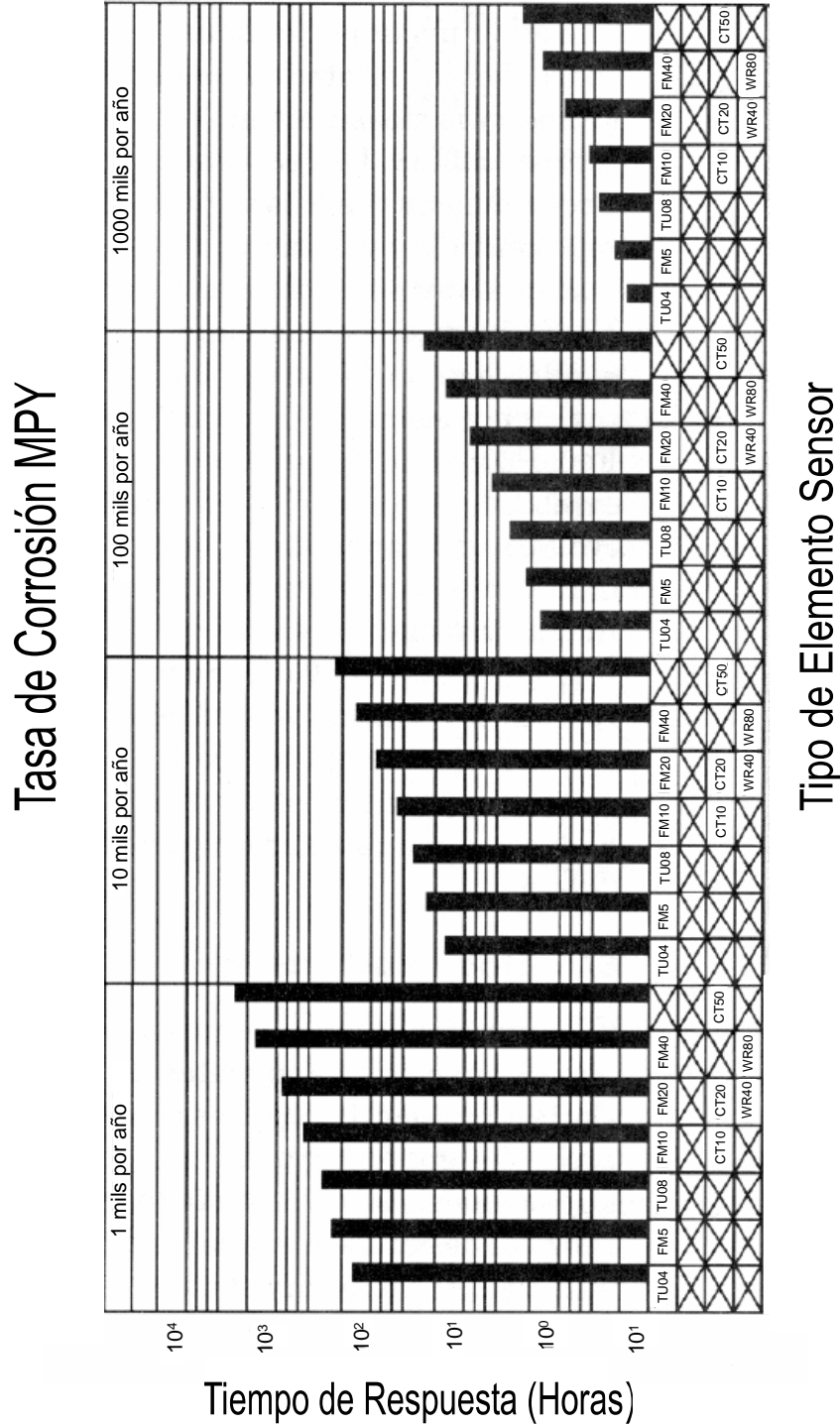


Leyenda

A ||||| B ■ C ||||| D

- A = Reemplazar en 2 años
- B = Reemplazar en 1 año
- C = Reemplazar en 3 meses
- D = Reemplazar en 6 semanas

## GUÍA DE SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS (TIEMPO DE RESPUESTA)





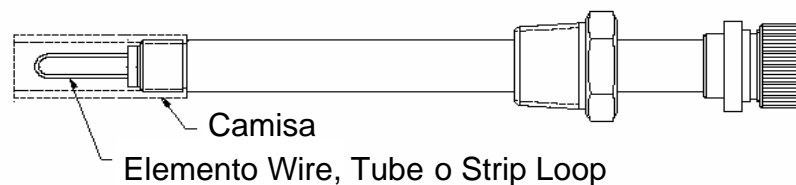
## CARÁCTERÍSTICAS DE LAS PROBETAS

Las probetas E/R o de resistencia eléctrica Metal Samples, se encuentran disponibles en una variedad de configuraciones y son explicadas en detalle en las páginas siguientes de este catálogo. Este resumen, provee una idea de la construcción de la probeta.

El material estándar de construcción para todos los cuerpos de las probetas Metal Samples es AISI 316L acero inoxidable, estando conforme con las especificaciones NACE MR-0175 para condiciones generales de servicio. Otros materiales pueden ser utilizados para ambientes extremadamente agresivos. Contacte a Supliequip C.A. para discutir las opciones alternativas.

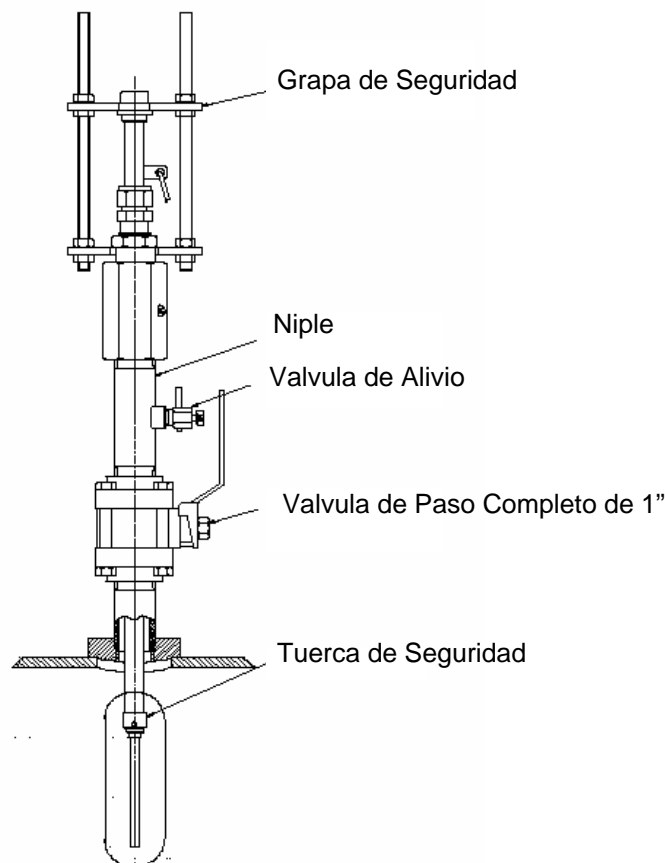
El mecanismo de sello de presión primario de las probetas Metal Samples puede variar con las especificaciones de la probeta. Sin embargo, todas las probetas Metal Samples incorporan, al final del instrumento, un sello de vidrio, a prueba de presión, como conector eléctrico, a prueba de fallas.

El más simple de todas las configuraciones del cuerpo de la probeta es la versión de longitud fija, mostrada en la figura siguiente. Típicamente equipada con un conector tipo tapón NPT o brida, esta probeta de longitud fija es enroscada o fijada en el sitio. La instalación o remoción de la probeta puede ser ejecutada únicamente durante una suspensión del servicio o proceso en la línea o tubería, a menos que la probeta sea instalada en una derivación que pueda ser aislada y despresurizada. La frecuencia en la que se pueda sacar de servicio el sistema, debe ser un factor a considerar en la selección de la vida útil de la probeta.



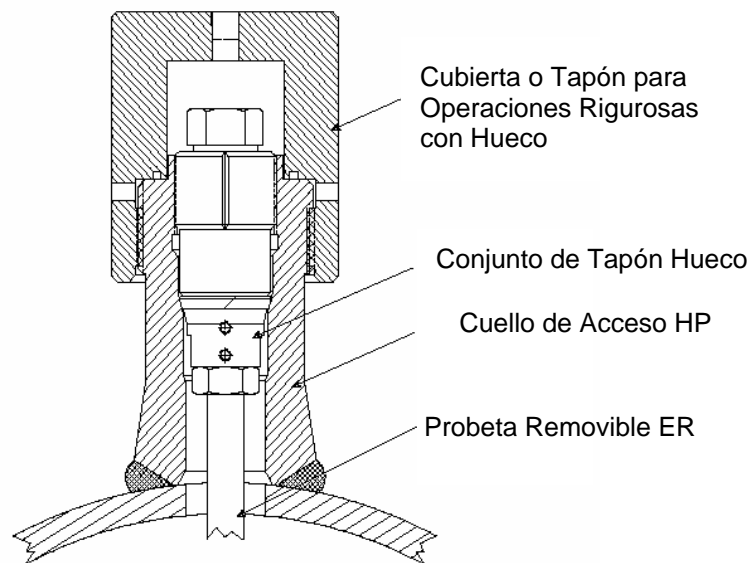
Por otro lado, las probetas retractables, suplidas con un packing gland de conexión FNPT de 1", permiten su inserción y remoción de la línea, a través de una válvula de bola, en sistemas donde la presión no excede los 1.500 psi. Un conjunto de seguridad puede ser añadido para prevenir los bruscos retrocesos causados por la presión interna del sistema. Metal Samples recomienda el uso del "Easy Tool" para la inserción o remoción de las probetas en sistemas con presiones mayores a los 150 psi.

Las probetas retractables tienen una amplia aplicación en industrias petroquímicas y en refinerías. Una típica probeta de este tipo es ilustrada en la siguiente figura.



Probeta Retráctil

Las probetas removibles son empleadas en procesos operando a presiones de hasta 3.600 psi. Estas probetas deben ser utilizadas en conjunto con un sistema de acceso especialmente diseñado, con una herramienta especial de remoción/inserción (Retrieval Tool) y una válvula de servicio, descritos todos en la sección de “Sistemas de Acceso para Alta Presión”. Este diseño es el estándar para sistemas de producción petroleros. Una instalación típica es ilustrada en la figura siguiente.



Probeta Removible