

Trabajo Fin de Grado

ANEXOS

Estudio del comportamiento ante la corrosión electroquímica de varios aceros inoxidables y superaleaciones mediante ensayos de polarización.
Study of the electrochemical corrosion behavior of various stainless steels and superalloys by means of polarization tests.

Autor/es

Ricardo Ríos Ruiz

Director/es

Anselmo Villellas Malo

Escuela de Ingeniería y Arquitectura EINA – Universidad de Zaragoza
2019

Tabla de contenido

1. ANEXOS	3
1.1 Las Curvas de Polarización y la Extrapolación de Tafel	3
1.1.1 Introducción	3
1.1.2. Determinación experimental de la velocidad de corrosión	4
1.2 Cálculo de la velocidad de corrosión	6
1.2.1. Metales puros o con muy baja aleación	6
1.2.2. Aleaciones	7
1.2.3. Cálculo del Peso Equivalente de una Aleación	7
1.3 Composición y características de las superaleaciones	9
1.3.A. Inconel 601	9
1.3.B. Inconel 617	10
1.3.C. Inconel 625	11
1.4 Metalografía de las aleaciones ensayadas.....	13
1.5 Cálculos de la preparación de los electrolitos	24
1.6 Gráficas de aproximación de Tafel obtenidas con el VoltaMaster 1	26
1.7 Gráficas realizadas con el programa Kaleidagraph.....	47

1. ANEXOS

1.1 Las Curvas de Polarización y la Extrapolación de Tafel

1.1.1 Introducción

En este procedimiento, se supone que la corrosión es uniforme y que el proceso que controla la cinética es la transferencia de carga. También se puede suponer que haya solamente una única reacción de corrosión, que es la disolución del metal en el electrolito (reacción anódica), y una única reacción de reducción (reacción catódica) en el electrolito en contacto con el metal. Los electrones de intercambio, n , se mueven por el metal y van desde las zonas anódicas a las catódicas. En el caso de los ensayos de corrosión electroquímicos que vamos a realizar, las zonas anódicas y catódicas se distribuyen uniformemente por la superficie de la pieza metálica expuesta.

Si tanto la reacción anódica como la catódica estuvieran en equilibrio y aisladas una de la otra en la superficie de la muestra, en un diagrama de potencial E frente a logaritmo de la densidad de corriente i serían dos puntos, el anódico con potencial E_a y densidad de corriente de intercambio i_{0a} , y el catódico con potencial E_c y densidad de corriente de intercambio i_{0c} , figura 5.1 (ejemplo de un metal en un medio ácido). Las densidades de corriente de intercambio se determinan experimentalmente, y dependen muy principalmente de la naturaleza de la superficie (que condiciona, como se verá un poco más adelante, fuertemente la cinética de las reacciones), mientras que los potenciales de equilibrio (que indican la tendencia termodinámica de las reacciones), que se calculan por Nernst, no dependen de la superficie en la que ocurren las reacciones. Hay un ejemplo en la referencia [1] que muestra que la densidad de corriente de intercambio de la reacción del hidrógeno (potencial 0 V) sobre mercurio es de 10^{-9} mA/cm², y sobre platino es de 1 mA/cm².

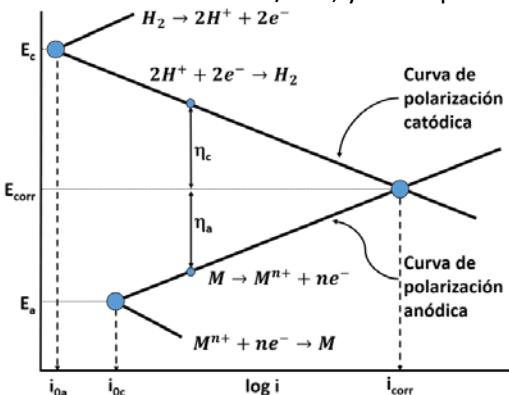
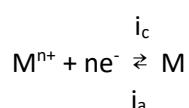


Figura 5.1. Diagrama de Evans de un metal en un medio ácido

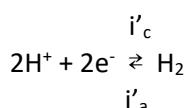
Las densidades de corriente de intercambio son iguales en los dos sentidos de cada reacción aislada. Por convenio se establece que la corriente anódica (sentido de la oxidación) es positiva y la catódica (sentido de la reducción) es negativa:



verificándose, en el equilibrio:

$$i_a = -i_c \quad \text{o bien} \quad |i_a| = |i_c| = |i_0|$$

Lo mismo ocurre para la otra reacción:



verificándose, en el equilibrio:

$$i'_a = -i'_c \quad \text{o bien} \quad |i'_a| = |i'_c| = |i'_0|$$

Para que ocurra una reacción neta en cualquiera de las dos reacciones anteriores, es necesario romper el equilibrio forzándolo en una dirección, ya sea hacia la izquierda (oxidación) o hacia la derecha (reducción). En un proceso electroquímico cualquiera, esto sucede debido a la influencia de otra reacción electroquímica, que tiene un potencial inicialmente distinto del de la primera.

Como, en el caso de una pieza de metal sumergida en una solución ácida, ambas zonas se encuentran realmente unidas a través del mismo metal y tienen diferentes potenciales iniciales, se dice que se polarizan (es decir, sus potenciales cambian) hasta confluir en un potencial intermedio, denominado potencial de corrosión, E_{corr} (también denominado potencial mixto), figura 2.1. En una mayoría de situaciones, una de las reacciones (la del metal) evoluciona en el sentido anódico (aumenta su potencial), mientras que la otra lo hace en el sentido catódico (disminuye su potencial). En el potencial de corrosión, los electrones cedidos por el metal al oxidarse son íntegramente consumidos por los hidrogeniones para reducirse a gas hidrógeno. La densidad de corriente (movimiento de electrones) de una reacción (anódica) a la otra (catódica), i_{corr} es la medida de la velocidad de corrosión, y ocurre en el interior de la pieza metálica sumergida en el electrolito, figura 2.1. Las curvas de polarización por activación (o por transferencia de carga) son asumidas como rectas (comprobado que son rectas, analítica y experimentalmente) en el diagrama $E - \log i$, y sus pendientes son las denominadas *pendientes de Tafel*. Por lo tanto, las rectas de Tafel (suponiendo que el mecanismo del proceso de polarización es, de forma exclusiva, por transferencia de carga) se pueden representar por ecuaciones como las siguientes:

$$h_a = \beta_a \times \log \frac{i_a}{i_{0a}} \quad \text{y} \quad h_c = \beta_c \times \log \frac{i_c}{i_{0c}}$$

siendo h el sobrepotencial (es la polarización de cada semirreacción, la diferencia entre el potencial E'_a o E'_c y el de equilibrio E_{0a} o E_{0c}), y β_a y β_c las pendientes de Tafel, figura 2.1. (Como se puede observar, las corrientes catódicas, que se asumen negativas, deben cambiarse de signo para poder ser representadas en los diagramas de Evans.) Los valores del sobrepotencial catódico son negativos, y positivos los del sobrepotencial anódico. La pendiente de Tafel de la rama catódica es, por tanto, negativa y la de la rama anódica, positiva.

En corrosión se parte del potencial de corrosión, y se polariza la muestra catódica y anódicamente. En este caso, el comportamiento de Tafel se representa con las ecuaciones siguientes:

$$\eta_a = \beta_a \times \log \frac{i_a}{i_{corr}} \quad \text{y} \quad \eta_c = \beta_c \times \log \frac{i_c}{i_{corr}}$$

siendo η_a y η_c las polarizaciones anódica y catódica, respectivamente, y que son los valores de los potenciales $E - E_{corr}$.

1.1.2. Determinación experimental de la velocidad de corrosión

Mediante los diagramas de Evans es posible determinar la densidad de corriente de corrosión, i_{corr} , sin más que hacer confluir ambas rectas de polarización, conocidos los valores del potencial de equilibrio y las densidades de corriente de intercambio iniciales de ambas reacciones, y sus correspondientes pendientes de Tafel. El punto de intersección da el valor tanto del potencial de corrosión como la densidad de corriente de corrosión.

Sin embargo, el procedimiento experimental para la determinación de la corriente de corrosión es diferente, y consiste en el montaje de una celda, figura 5.2a con tres electrodos (trabajo, referencia y auxiliar), un electrolito, y un potenciómetro-galvanómetro, figura 5.2b. El potencial que se mide espontáneamente entre el de trabajo y el de referencia es el E_{corr} . La intensidad a ese potencial, medible entre el de trabajo y el auxiliar, es cero, ya que los electrones se producen y se consumen dentro del electrodo de trabajo.

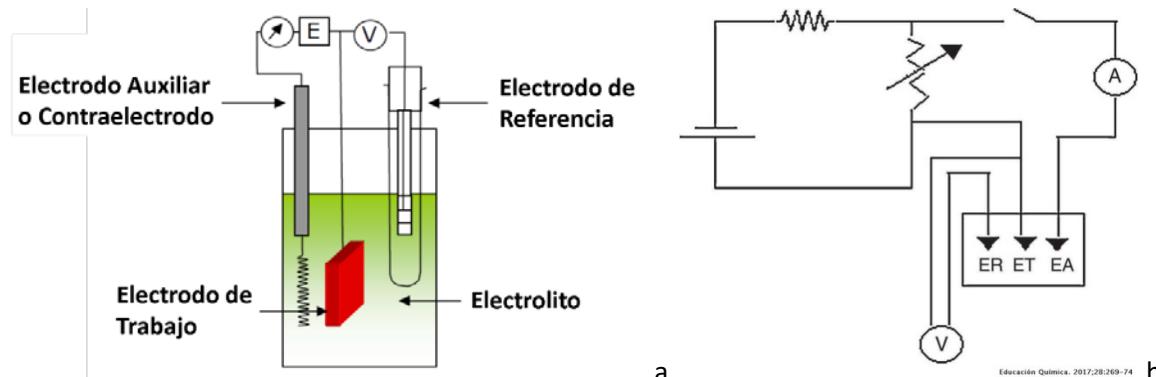


Figura 2.2. a) Esquema de una celda electrolítica con tres electrodos: trabajo, auxiliar y referencia¹, b) esquema de un potenciómetro²

Para determinar la i_{corr} es necesario polarizar continuamente la muestra desde un potencial inferior al de corrosión (E_i) a otro superior (E_f); es el procedimiento potencioscótico, figura 5.3. (El procedimiento galvanoscótico consistiría en aplicar un barrido de corriente entre dos valores extremos, uno por encima de 0 A y otro por debajo.) Al separarnos del potencial de corrosión por debajo de éste, la intensidad de la reacción catódica es mayor que la anódica: el equipo, por tanto, da electrones al electrodo de trabajo, ya que la reacción anódica suministra menos de los necesarios para la catódica. Lo contrario ocurre por encima de aquél: el equipo extrae electrones de la reacción anódica porque la anódica genera muchos más que los que consume la catódica. Cuando los potenciales se encuentran a una cierta distancia del de corrosión, y dado que la escala de la intensidad (o de la densidad de corriente) es logarítmica, la densidad de corriente medida (i_M) será, prácticamente, la anódica (i_a) o la catódica (i_c), según estemos por encima o por debajo del potencial de corrosión. Sin embargo, conforme nos acercamos al valor de E_{corr} , ambas corrientes son numéricamente comparables, y las curvas de polarización se van curvando hacia el cero de intensidad al potencial de corrosión (en el infinito en este diagrama semilogarítmico); siempre se cumple que:

$$|i_M| = ||i_a| - |i_c||$$

Si las curvas experimentales tienen tramos rectos (como se ha representado en la figura 5.3), se pueden ajustar rectas en dichos tramos, y extrapolarlas hasta que se corten en el punto común del potencial de corrosión E_{corr} . La densidad de corriente correspondiente a ese punto es la de corrosión, i_{corr} . Así es como se desarrolla la extrapolación de Tafel; las pendientes de dichas rectas son las de Tafel, y que idealmente tienen continuidad con las curvas de Evans (figuras 5.1 y 5.3).

Las curvas de polarización experimentales no siempre tienen tramos rectos en alguna o ambas ramas (anódica y catódica), ya que las condiciones de polarización por transferencia de carga (o de activación) no son "puras", y puede haber polarización por concentración y/o resistencia, y/u otros fenómenos que evitan esa linealidad. Ello complica bastante el poder establecer con certeza suficiente la velocidad de corrosión. En general, se da por válido para la extrapolación de Tafel que haya solamente un tramo recto en una de las ramas, y siempre a un potencial mayor de 100 mV como mínimo del potencial de corrosión (para su justificación teórica ver el Anexo 7), y que se extienda aproximadamente un orden de magnitud de la densidad de corriente. Con frecuencia, es la rama catódica la que permite obtener una pendiente adecuada.

¹ <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/8231/1/CorrTema5.pdf>

² M. Alfaro y I. Alfaro. *Construcción de un Potenciómetro de Bajo Costo para Estudios de Inhibición de Corrosión de Acero: Determinación del Potencial de Corrosión y Mediciones Cronoamperimétricas*. Educación Química, vol 28, 2017.

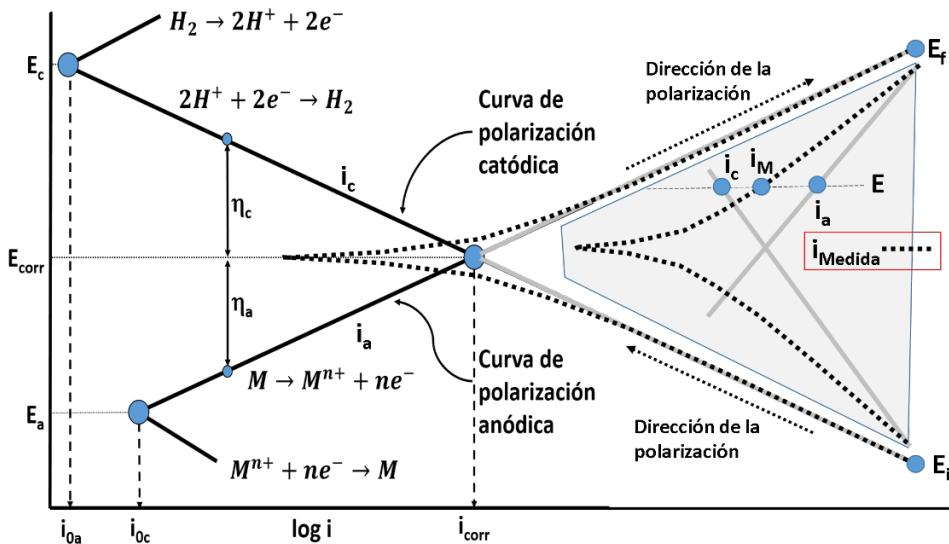


Figura 2.3. Medida experimental de la velocidad de corrosión i_{corr} . La zona en gris es una ampliación de la zona de unión de las curvas de polarización anódica y catódica.

Finalmente, y como resumen e este apartado, conviene recalcar que la aproximación de Tafel se realiza bajo las siguientes suposiciones o hipótesis:

- ✓ Todas las ecuaciones utilizadas tienen como condición que la cinética de las reacciones está exclusivamente bajo control de activación (polarización por transferencia de carga).
- ✓ El potencial de corrosión no está cerca de los potenciales de equilibrio de las reacciones que están ocurriendo en el electrodo de trabajo; es decir, E_{corr} está alejada de E_{0a} y E_{0c} .
- ✓ El metal funciona simultáneamente como ánodo y como cátodo, y la corrosión se supone uniforme. Las áreas anódica y catódica son iguales entre sí, y son iguales al área expuesta el metal en el electrolito.
- ✓ No hay otras reacciones electroquímicas secundarias.

1.2 Cálculo de la velocidad de corrosión

Una vez determinada la densidad de corriente de corrosión, i_{corr} , a partir de ese valor se puede calcular la velocidad de corrosión en unidades de utilidad para la ingeniería, como es la pérdida de espesor por año o la pérdida de masa por año. Conviene distinguir dos casos: a) Metal puro a aleación con muy bajos contenidos de aleantes, y b) Aleaciones.

1.2.1. Metales puros o con muy baja aleación

Cuando se trata de metales puros o metales de baja aleación, el procedimiento es más sencillo. Para el cálculo, se debe utilizar la densidad del metal (ρ), su peso atómico (PA) y el grado de oxidación (valencia) en ese medio (n). La ecuación de la pérdida de espesor por año (Δe) es:

$$\Delta e \left(\frac{cm}{año} \right) = \frac{i_{corr} \left(\frac{Cul}{s \cdot cm^2} \right) \times (365 \cdot 24 \cdot 3600) \left(\frac{s}{año} \right)}{96500 \left(\frac{Cul}{mol e^-} \right) \times n \left(\frac{mol e^-}{mol M dis} \right)} \times \frac{PA \left(\frac{g}{mol M} \right)}{\rho \left(\frac{g}{cm^3} \right)} \left(\frac{cm^3}{cm^2 \cdot año} \right)$$

La pérdida total de masa por año (Δm) se expresa en función de toda la superficie expuesta al electrolito (A), y la expresión resultante es la siguiente (a partir de la anterior):

$$\Delta m \left(\frac{g}{a\text{ño}} \right) = \frac{i_{corr} \left(\frac{Cul}{s \cdot cm^2} \right) \times (365 \cdot 24 \cdot 3600) \left(\frac{s}{a\text{ño}} \right)}{96500 \left(\frac{Cul}{mol e^-} \right) \times n \left(\frac{mol e^-}{mol M \cdot dis} \right)} \times PA \left(\frac{g}{mol M} \right) \times A(cm^2) \left(\frac{g \cdot cm^2}{cm^2 \cdot a\text{ño}} \right)$$

En química reaccionan siempre entre sí el mismo número de equivalentes químicos. En el caso de metales, el peso de un equivalente-gramo es el peso atómico dividido por su valencia. En la situación de la corrosión, del metal que se disuelve (se corroe), su equivalente-gramo es su peso atómico dividido por su grado de oxidación (PA/n). Y un equivalente-gramo de electrones, que son 96500 culombios (constante de Faraday), siempre es producido por un equivalente gramo del metal puro.

1.2.2. Aleaciones^{3 4}

Cuando se trata estudiar la corrosión de aleaciones en la que todos los elementos mayoritarios (normalmente de contenido superior al 1% en peso (los de porcentaje inferior no se tienen en cuenta) participan en la formación de iones, y no hay corrosión preferente de ninguno sobre otro cualquiera, una forma sencilla de tratarlas es determinar el peso atómico promedio (PA_m) y el peso equivalente promedio (Peq_m), y con ello su grado de oxidación promedio (n_m). La densidad suele encontrarse en la bibliografía y en catálogos comerciales para cada aleación.

Los distintos metales que constituyen las aleaciones pueden tener distintos estados oxidados, pero hay que asumir que uno de los posibles es el que se va a producir preferentemente.

El cálculo del equivalente promedio se realiza, para una aleación con una serie de elementos metálicos de los que se conoce su porcentaje en peso, calculando el número de equivalentes-gramo de cada uno de los metales en un gramo (o cualquier otra unidad de masa) de aleación. Véase el siguiente ejemplo a continuación.

1.2.3. Cálculo del Peso Equivalente de una Aleación^{5 6}

Una superaleación Inconel 601, por ejemplo, posee la siguiente composición en % en peso:

13% Fe, 23% Cr y 60.5% Ni

Los grados de oxidación (valencias) primarias (las hay secundarias, terciarias, etc.) son:

Fe (+2), Cr (+3) y Ni (+2)

Los pesos atómicos de los elementos que la componen son:

Fe (55.8), Cr (52.0) y Ni (58.7)

En un gramo de aleación habrá un número de equivalentes:

$$N_{eq} = (0.13 \times 2 / 55.8) + (0.23 \times 3 / 52.0) + (0.605 \times 2 / 58.7) = \\ = 0.0385 N_{eq}/g$$

La inversa es el peso de un equivalente promedio de esa superaleación:

$$Peq_m = 25.95 \text{ g}/eq$$

³ D. A. Jones. *Principles and Prevention of Corrosion*. Chapter 3: *Electrochemical Kinetics of Corrosion*, pp 76-77. Ed. Prentice Hall Inc., USA, 2nd Edition, 1996.

⁴ ASTM G 102-89 (2015). *Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements*. American Society for Testing and Materials (ASTM), Philadelphia, USA.

⁵ D. A. Jones. *Principles and Prevention of Corrosion*. Chapter 3: *Electrochemical Kinetics of Corrosion*, pp 76-77. Ed. Prentice Hall Inc., USA, 2nd Edition, 1996.

⁶ ASTM G 102-89 (2015). *Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements*. American Society for Testing and Materials (ASTM), Philadelphia, USA.

Un mol de aleación será el inverso del resultado de la suma anterior sin tener en cuenta los grados de oxidación:

$$N_{\text{mol}} = (0.13 / 55.8) + (0.23 / 52.0) + (0.605 / 58.7) = \\ = 0,01706 \text{ N}_{\text{mol}}/\text{g}$$

Y el inverso es el peso atómico promedio:

$$PA_m = 58.62 \text{ g/mol}$$

La valencia promedio (o mejor, el grado de oxidación promedio (n_m), será el cociente entre el peso atómico promedio (PA_m) y el peso equivalente promedio (Peq_m):

$$n_m = 58.62 / 25.95 = 2.26$$

1.3 Composición y características de las superaleaciones

1.3.A. Inconel 601⁷

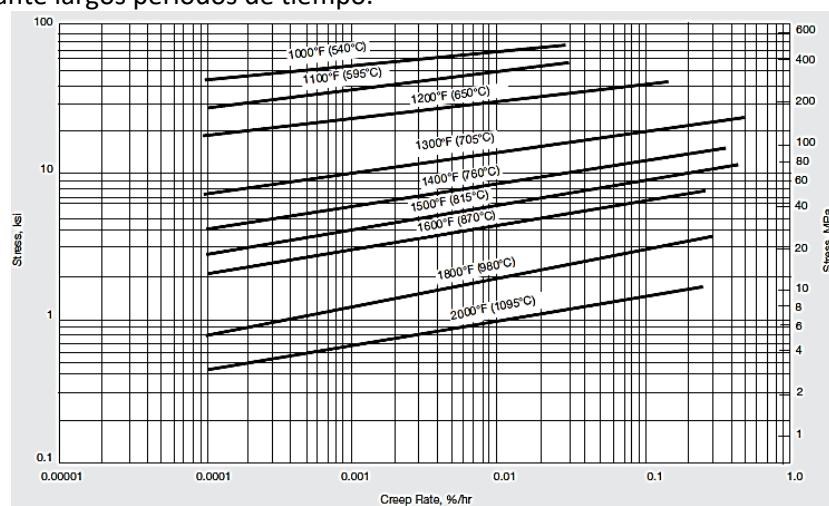
La superaleación Inconel 601 es una aleación de níquel-cromo-hierro con estructura FCC (cúbica centrada en caras) y una muy buena estabilidad metalúrgica. Es, como las otras dos empleadas en este trabajo, de las que endurecen por solución sólida (no endurecen por precipitación). La aleación es de base níquel con un alto contenido en cromo, lo cual proporciona una buena resistencia a muchos entornos corrosivos a medias y altas temperaturas. También, debido al aluminio en la aleación, es resistente a la oxidación a altas temperaturas. Esta aleación tiene una alta resistencia mecánica, buenas maquinabilidad y soldabilidad, y se puede deformar fácilmente. La composición química se muestra en la tabla siguiente.

Níquel	58.0-63.0 %
Cromo	21.0-25.0 %
Hierro	Restante
Aluminio	1.0-1.7 %
Carbono	0.10 % máx.
Manganese	1.0 % máx.
Azufre	0.015 % máx.
Silicio	0.5 % máx.
Cobre	1.0 % máx.

Composición química del Inconel 601

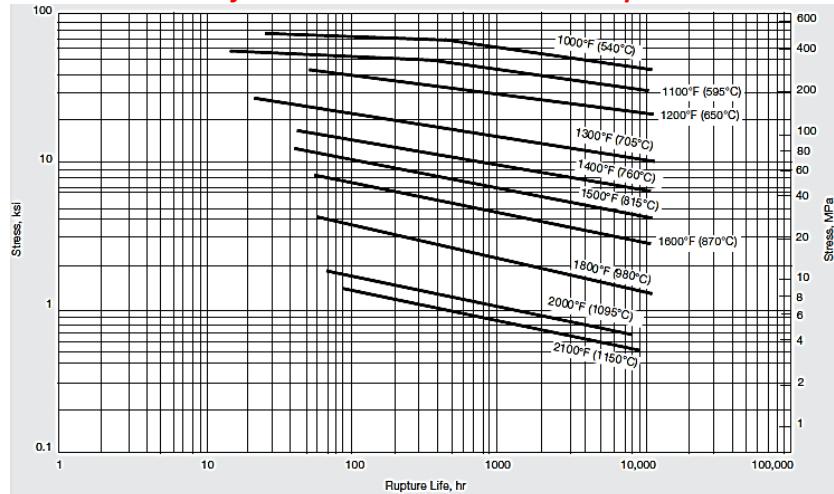
El Inconel 601 es un material que se usa frecuentemente en la construcción de diferentes tipos de equipamiento de procesado térmico, como en hornos industriales (en tubos de radiación, escudos de llamas, elementos calentadores resistentes eléctricamente, etc.) y también en equipos para el recocido de piezas, para cementación y nitruración, y otras aplicaciones térmicas. También se utiliza en procesos químicos, como en tubos condensadores y en carcasa aislantes de reformadores de amoníaco, en aplicaciones de control de contaminantes (cámaras de combustión de incineradores, y reactores térmicos en sistemas de evacuación), en el campo de la generación de energía y en la industria aeroespacial.

Una característica muy importante del Inconel 601 es que tiene una resistencia a la termofluencia y a la rotura a altas temperaturas muy buena. Por esto, y por su gran resistencia a la oxidación y corrosión a altas temperaturas, esta superaleación es ampliamente utilizada en equipos que deban soportar altas temperaturas durante largos períodos de tiempo.



⁷ <http://www.specialmetals.com/assets/smcd/documents/alloys/inconel/inconel-alloy-601.pdf>

Resistencia a la termofluencia del Inconel 601 tratado por solución a 1150°C



Resistencia a la rotura del Inconel 601 tratado por solución a 1150°C

1.3.B. Inconel 617^{8 9}

La supraleación Inconel 617 es una aleación de Níquel-Cromo-Cobalto-Molibdeno con una gran resistencia a la oxidación, a numerosos entornos corrosivos y tiene una gran resistencia mecánica a altas temperaturas; es fácilmente deformable y soldable mediante técnicas de soldadura convencionales. La composición química se muestra en la tabla siguiente.

Níquel	Restante
Cromo	20.0-24.0 %
Cobalto	10.0-15.0 %
Molibdeno	8.0-10.0 %
Aluminio	0.8-1.5 %
Carbono	0.05-0.15 %
Hierro	3.0 % máx.
Manganoso	1.0 % máx.
Silicio	1.0 % máx.
Azufre	0.015 % máx.
Titanio	0.6 % máx.
Cobre	0.5 % máx.
Boro	0.006 % máx.

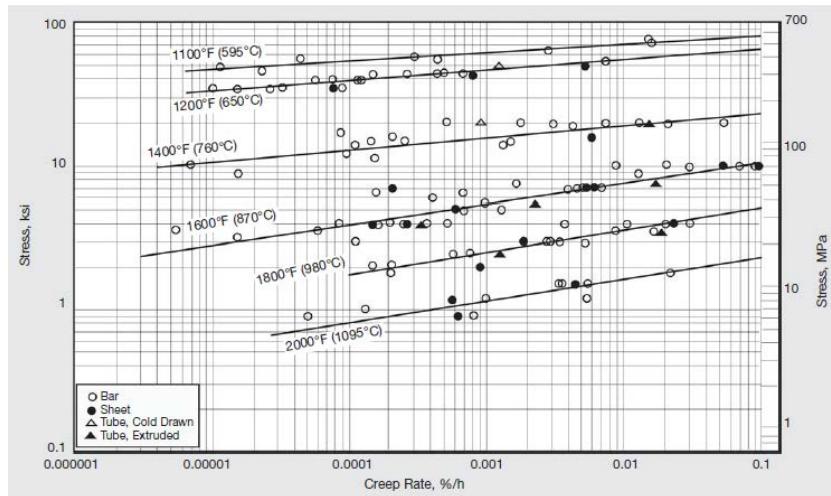
Composición química del Inconel 617

Los altos contenidos de níquel y cromo en la aleación proporcionan una alta resistencia tanto a la oxidación como a la reducción de la aleación. El aluminio, junto con el cromo, proporciona la resistencia a la oxidación a altas temperaturas; esto es debido a que, cuando la aleación es sometida a altas temperaturas, estos elementos forman una fina capa protectora de óxido.

Su alta resistencia mecánica y su resistencia a la oxidación a temperaturas superiores a 980°C hacen al Inconel 617 un material atractivo para diferentes componentes de turbinas de gas, tanto de aviación como de tierra. Su resistencia a la corrosión a altas temperaturas lo hace útil en el refinado del molibdeno. Esta superaleación también es usada en componentes de plantas de energía y de hornos industriales.

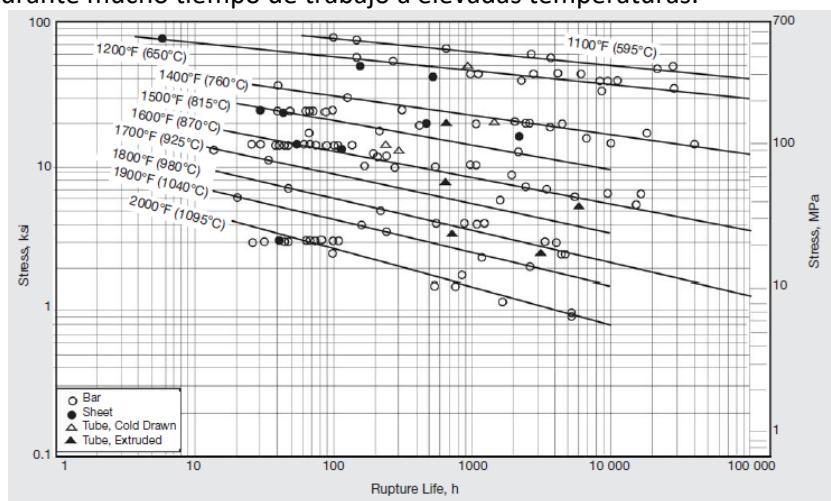
⁸ <http://www.specialmetals.com/assets/sm/documents/alloys/inconel/inconel-alloy-617.pdf>

⁹ <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=7746>



Resistencia a la fluencia del Inconel 617 tratado por solución a 1095°C.

En cuanto a la resistencia a la fluencia y a la rotura, el Inconel 617 es excepcional incluso a temperaturas superiores a los 980°C. Esta excelente resistencia a la termofluencia y a la rotura, junto a su buena resistencia en entornos oxidantes y carburizantes, hacen a esta superaleación perfecta para trabajar a altas tensiones durante mucho tiempo de trabajo a elevadas temperaturas.



Resistencia a la rotura del Inconel 617 tratado por solución a 1095°C.

El Inconel 617 tiene una estructura FCC (cúbica centrada en caras) y una buena estabilidad metalúrgica. Cuando es expuesto a altas temperaturas, se produce un endurecimiento debido a la formación de carburos y a la precipitación de fase gamma prima cuando se expone a temperaturas comprendidas entre 650 y 760°C.

1.3.C. Inconel 625^{10 11}

La superaleación Inconel 625 es una aleación de Níquel-Cromo con contenidos en molibdeno y niobio, los cuales le proporcionan una buena resistencia mecánica ya que tienen un efecto de endurecimiento, de esta manera no se necesita realizar ningún tratamiento de endurecimiento por precipitación. Esta combinación también hace que la aleación sea muy resistente a una amplia variedad de entornos corrosivos bastante severos, así como a la oxidación y carburización a altas temperaturas. Esta aleación tiene gran resistencia a la corrosión y una excelente fabricabilidad.

¹⁰ <https://www.langleyalloys.com/es/products/aleacion-alloy-625/>

¹¹ <http://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/alloys/inconel/inconel-alloy-625.pdf>

Esta superaleación es muy utilizada en sistemas que tengan que trabajar en agua de mar, ya que tiene una gran resistencia a la corrosión, a la fatiga, a la tracción, a la rotura por corrosión por el ion cloro y está libre de ataque local (corrosión de la grieta y por picadura). Es bastante utilizada en submarinos, en la marina, en cables de comunicación bajo en agua, etc. También se usa en equipos de procesamiento químico, tornillería, revestimientos... Debido a su buena resistencia y ductilidad desde temperaturas que se encuentran bajo cero hasta más de 980°C, esta aleación 625 es ideal para estas aplicaciones. La buena fabricabilidad del Inconel 625 hace que este se fabrique en diferentes formas para varios usos, como, por ejemplo, se usa para la fabricación de tubos en donde se requiera que haya resistencia a la corrosión, resistencia mecánica y transferencia de calor, ya que, como esta aleación tiene una alta resistencia mecánica, las paredes de los tubos pueden ser más estrechas, permitiendo así una mejor transferencia de calor. Esta aleación también tiene usos interesantes en el campo nuclear, utilizándose en núcleos de reactores nucleares de agua. Las aplicaciones del Inconel 625 son de gran importancia, por lo que la superaleación debe estar perfectamente fabricada, ya que fallos de este material pueden tener peligrosas consecuencias.

Níquel	Restante
Cromo	20.0-23.0 %
Hierro	5.0 % máx.
Molibdeno	8.0-10.0 %
Niobio (más Tantalo)	3.15-4.15 %
Carbono	0.1 % máx.
Manganoso	0.5 % máx.
Silicio	0.5 % máx.
Fósforo	0.015 % máx.
Azufre	0.015 % máx.
Aluminio	0.4 % máx.
Titanio	0.4 % máx.
Cobalto	1.0 % máx.

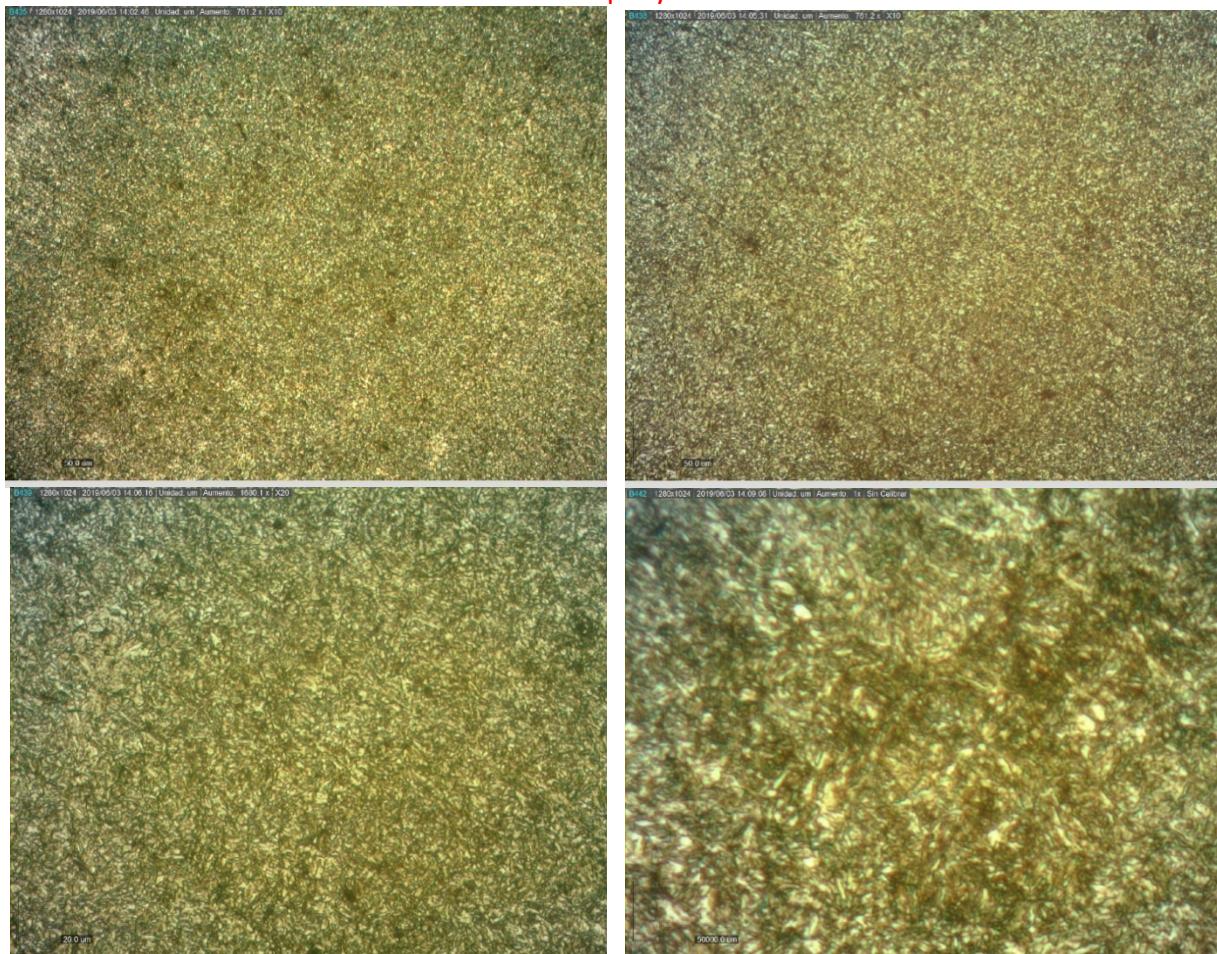
Composición química del Inconel 625

La estructura de la superaleación Inconel 625 es FCC (cúbica centrada en las caras), endurecida por solución sólida. Esta aleación puede contener carburos ricos en níquel, niobio, molibdeno y cromo. El endurecimiento es debido a la precipitación de una fase gamma prima rica en níquel y niobio. A temperaturas entre 537 y 982°C, esta aleación no tiene ninguna fase intermetálica, como la fase sigma.

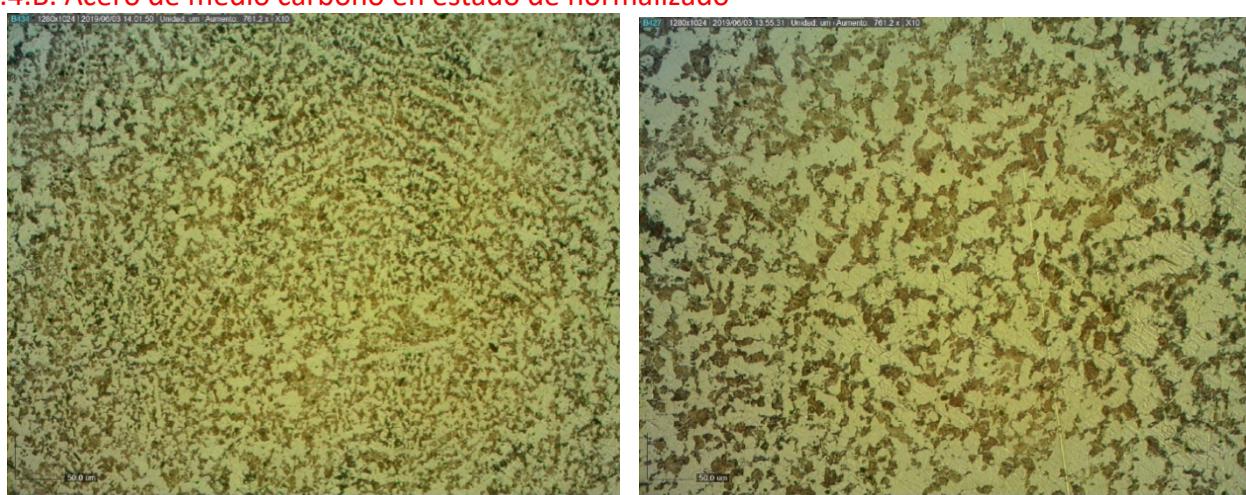
El alto contenido en aleantes del Inconel 625 le permite soportar entornos muy corrosivos. No sufre ataque corrosivo en entornos como la atmósfera, agua de mar, sales neutras.

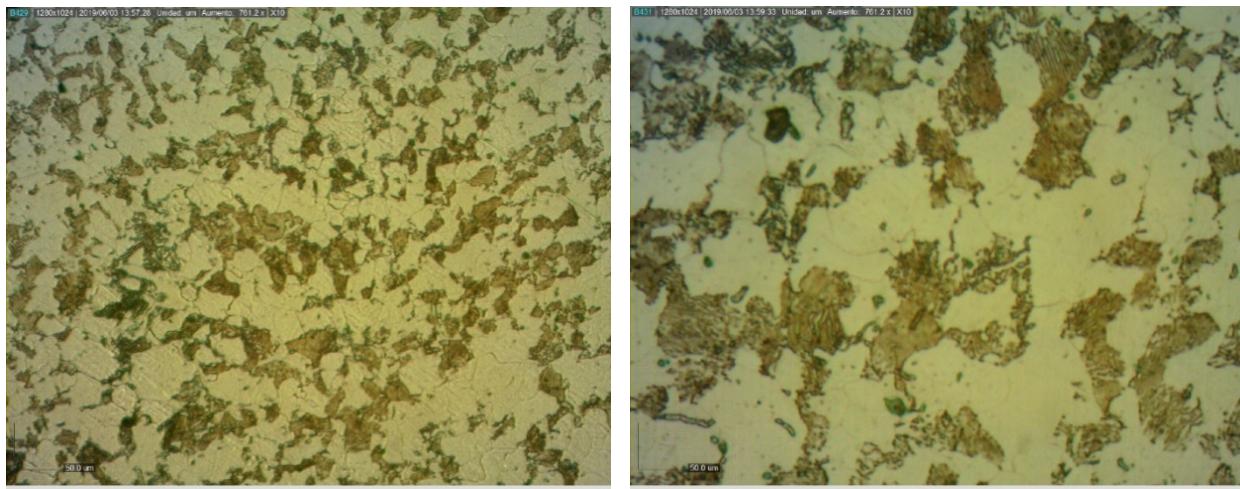
1.4 Metalografía de las aleaciones ensayadas

1.4.A. Acero de medio carbono en estado de temple y revenido

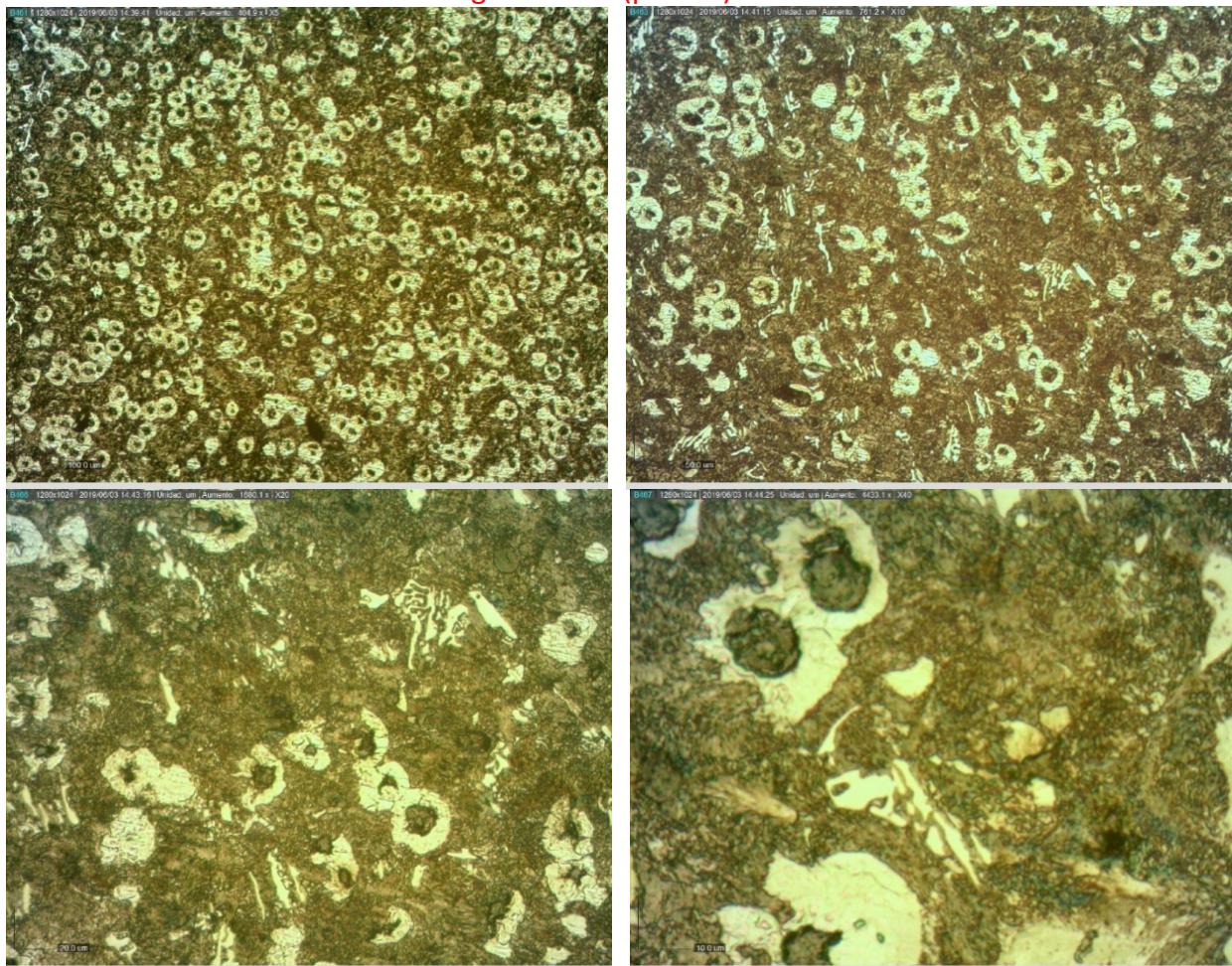


1.4.B. Acero de medio carbono en estado de normalizado

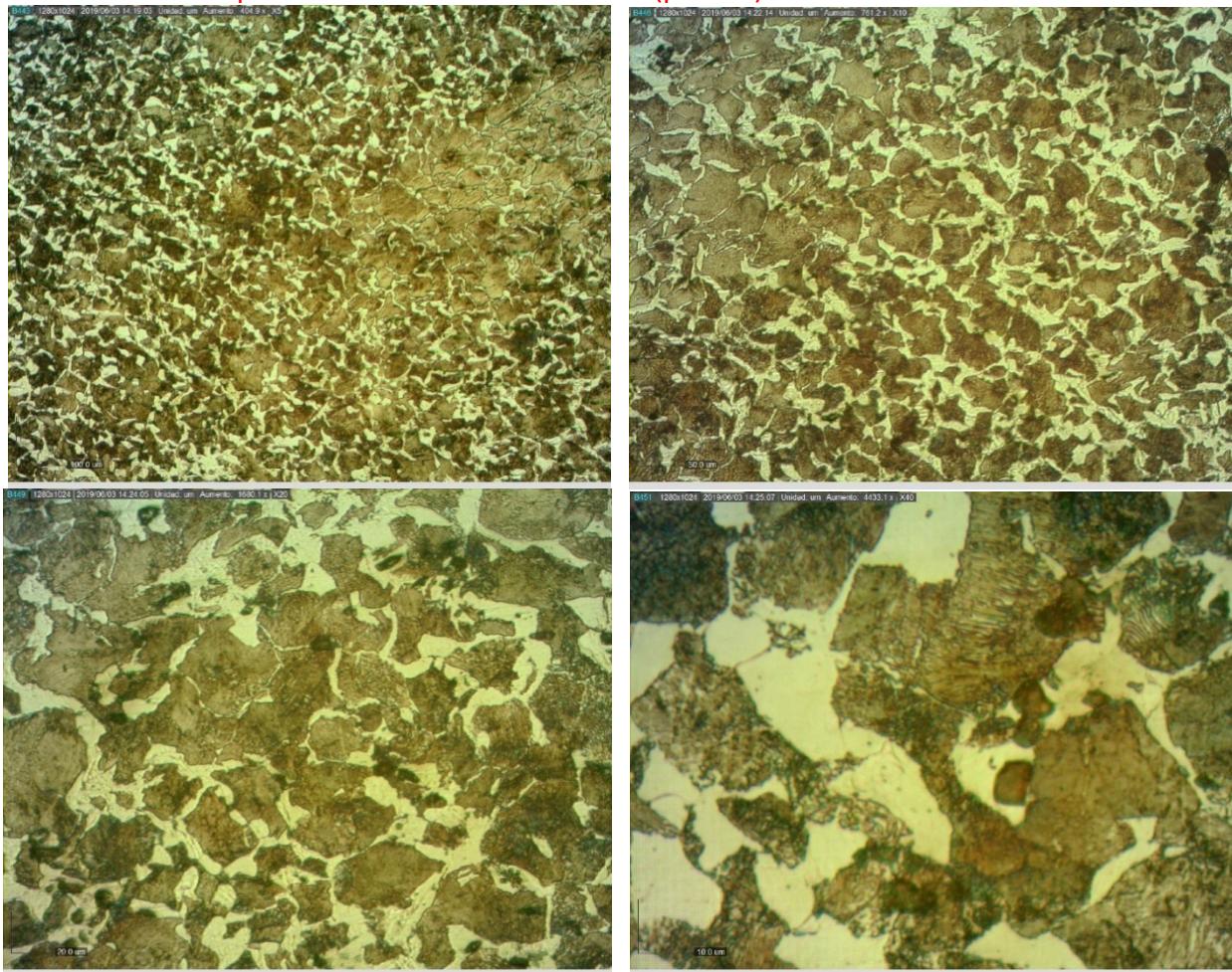




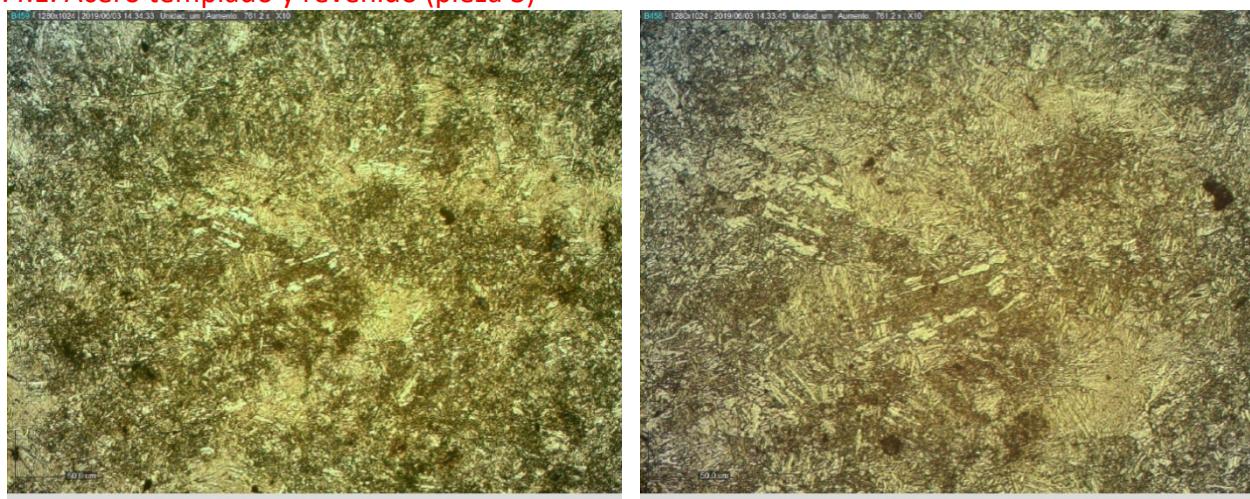
1.4.C. Fundición Nodular con cierta degeneración (pieza 1)

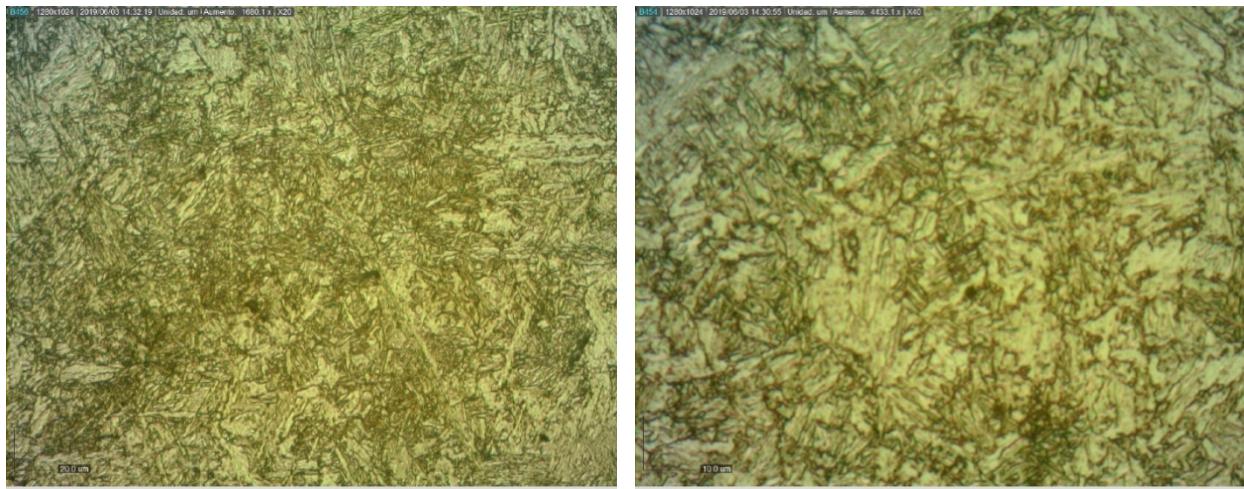


1.4.D. Acero ferrito-perlítico de medio-alto carbono (pieza 2)

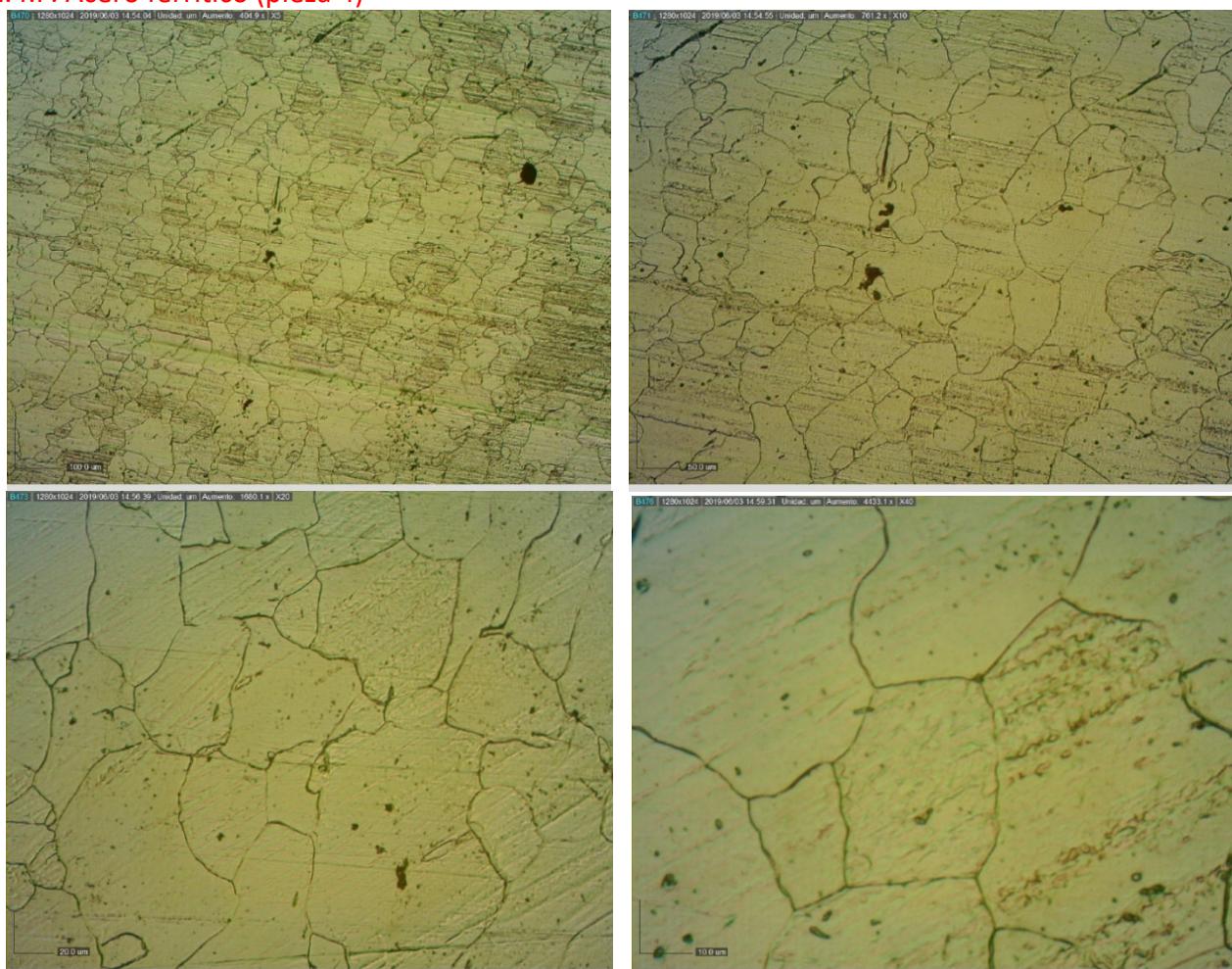


1.4.E. Acero templado y revenido (pieza 3)

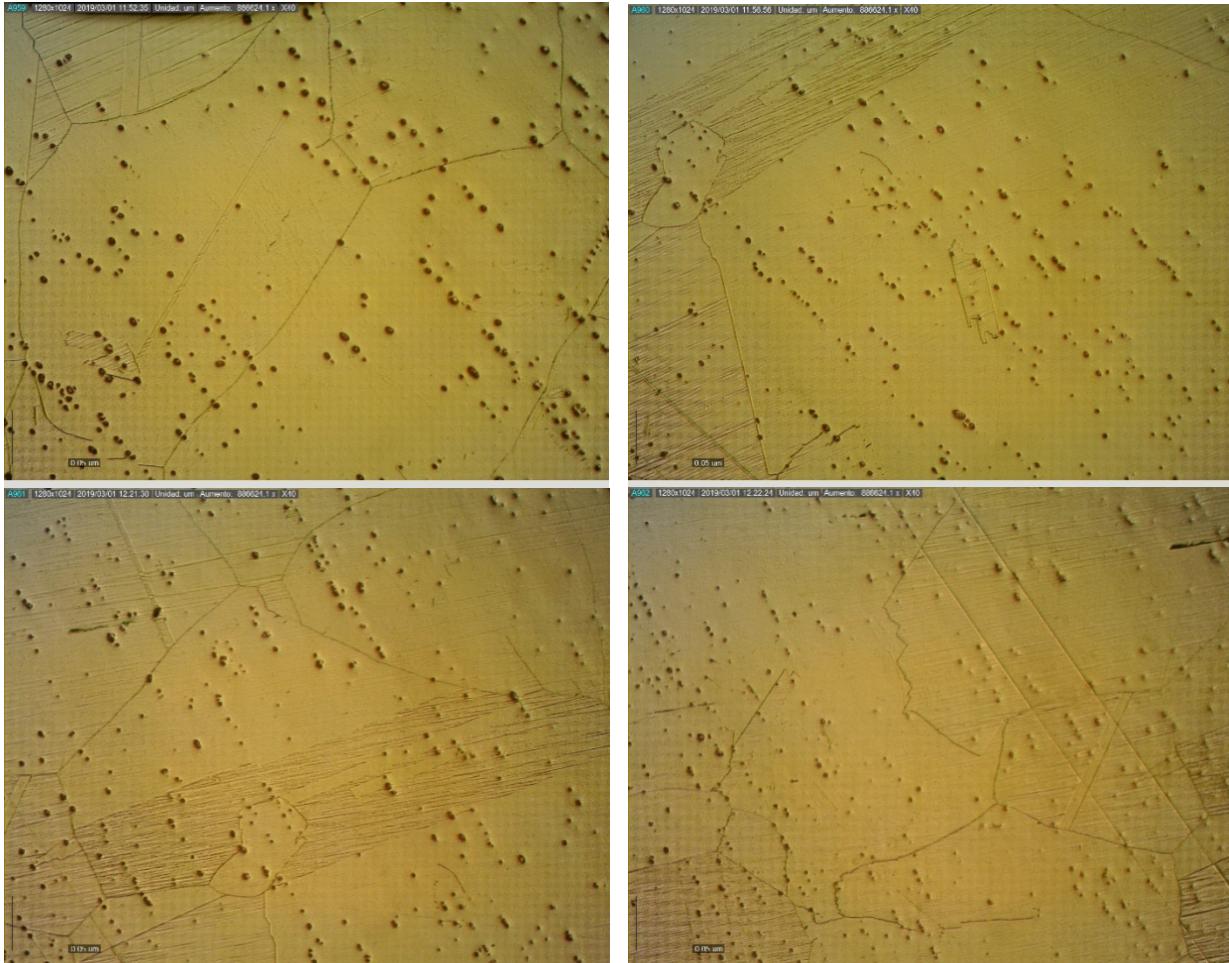




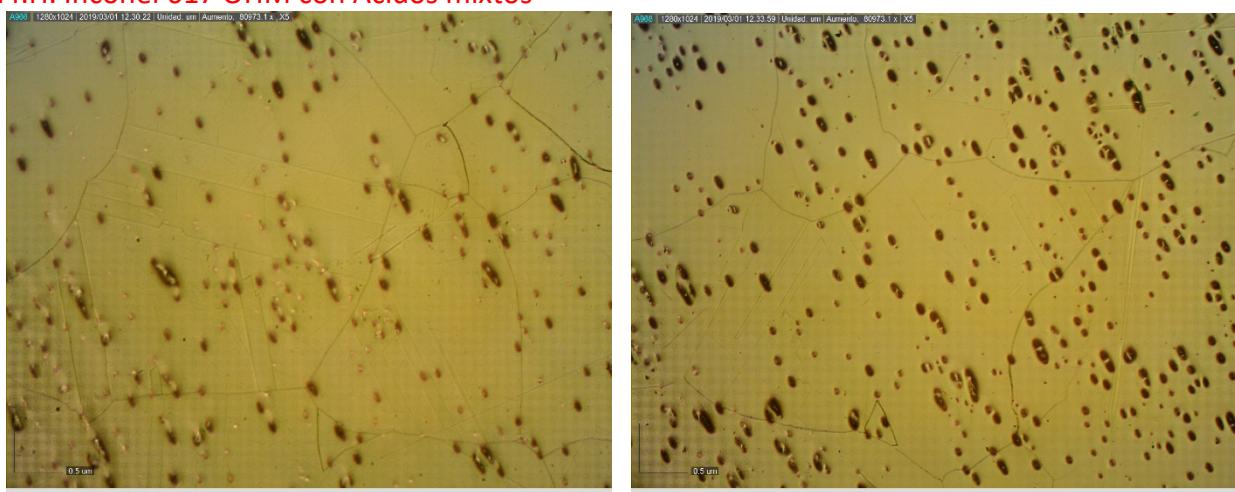
1.4.F. Acero ferrítico (pieza 4)

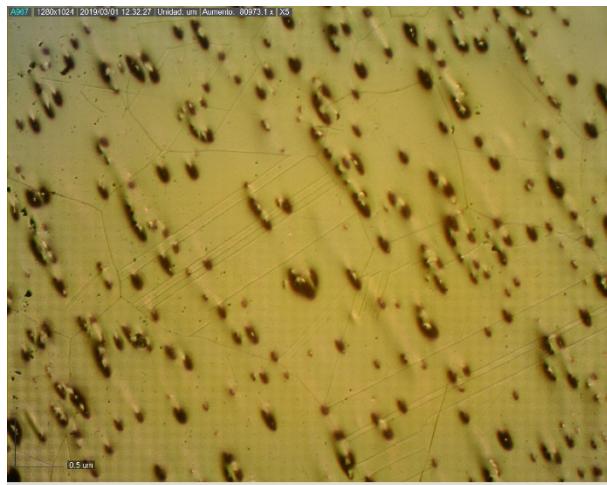


1.4.G. Inconel 601 con Ácidos mixtos



1.4.H. Inconel 617 OHM con Ácidos mixtos

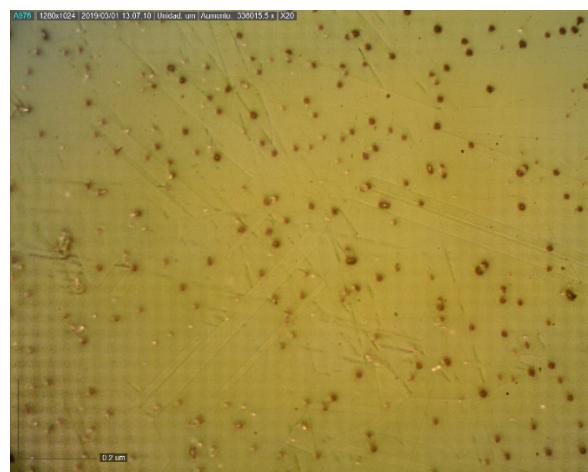
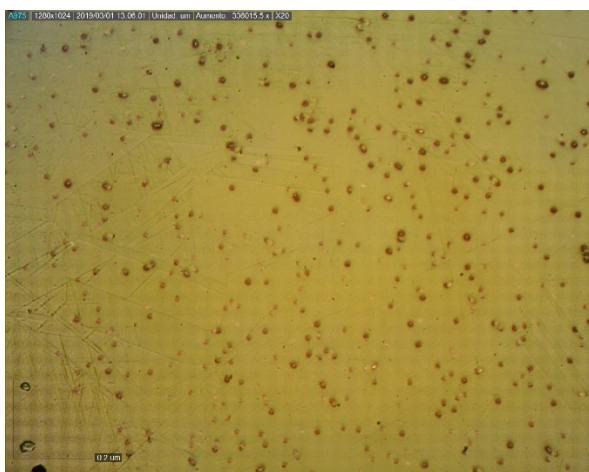
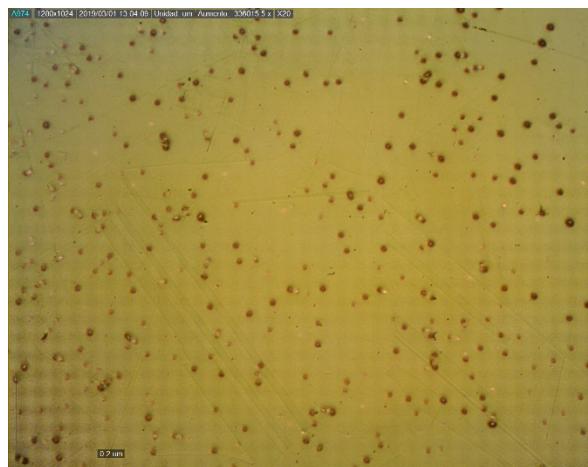
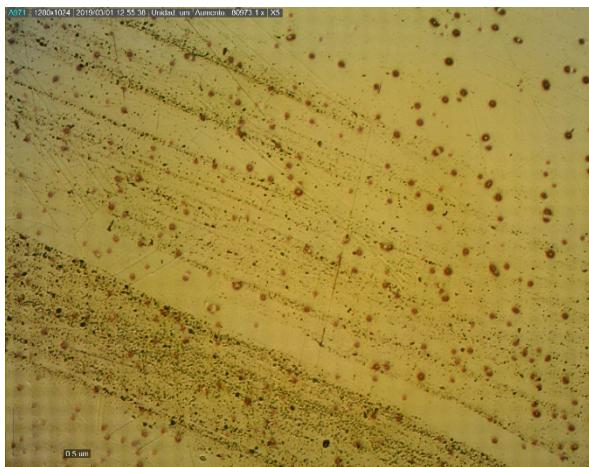




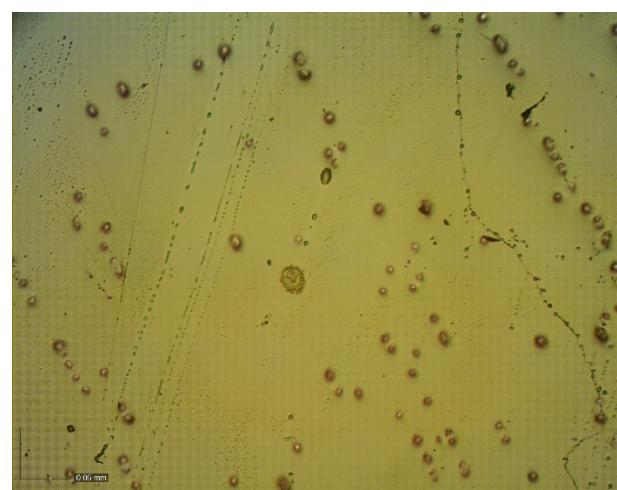
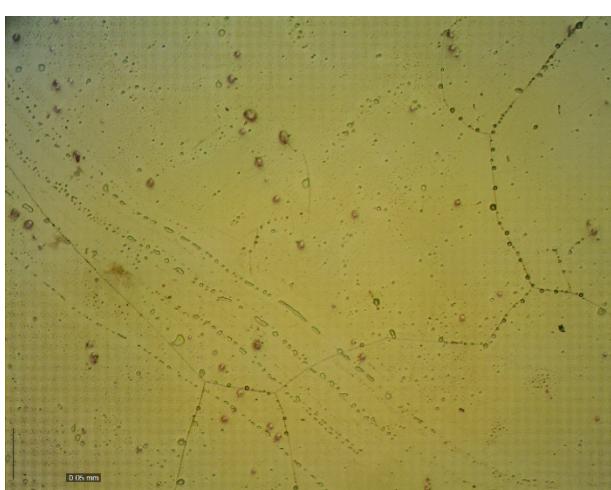
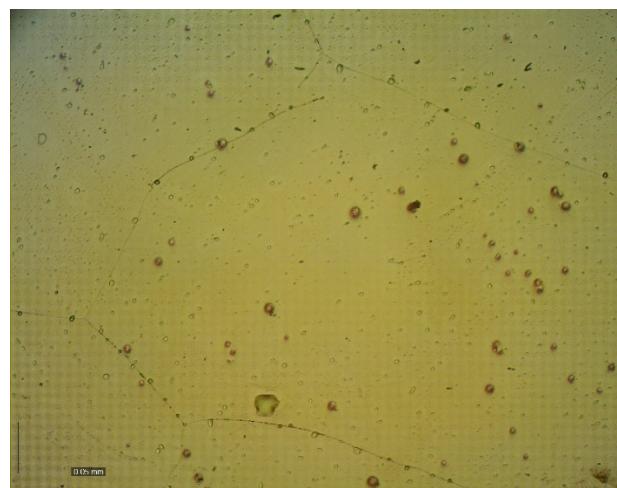
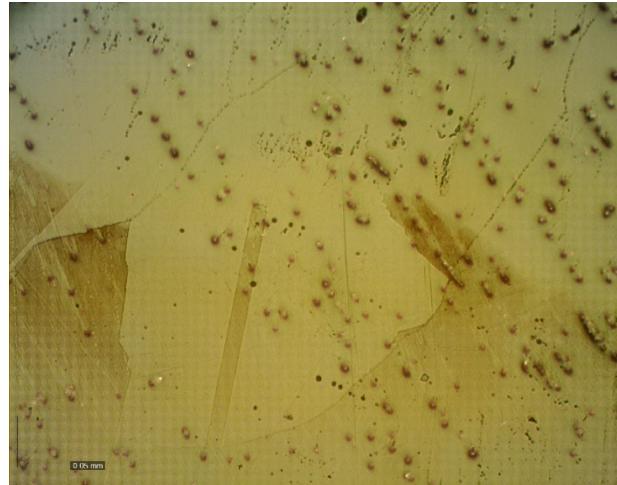
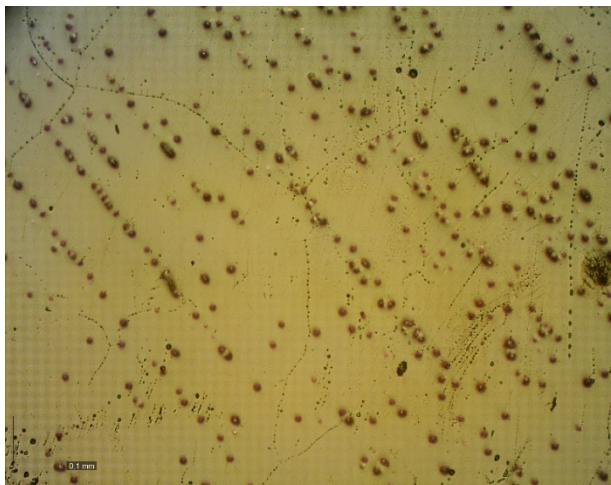
1.4.1. Inconel 617 SM con Ácidos mixtos



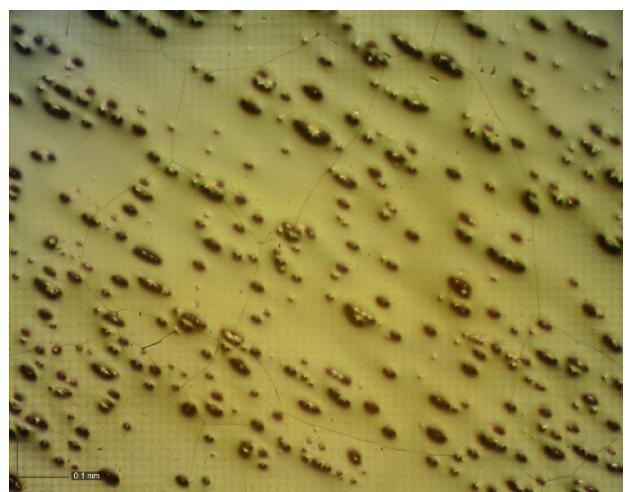
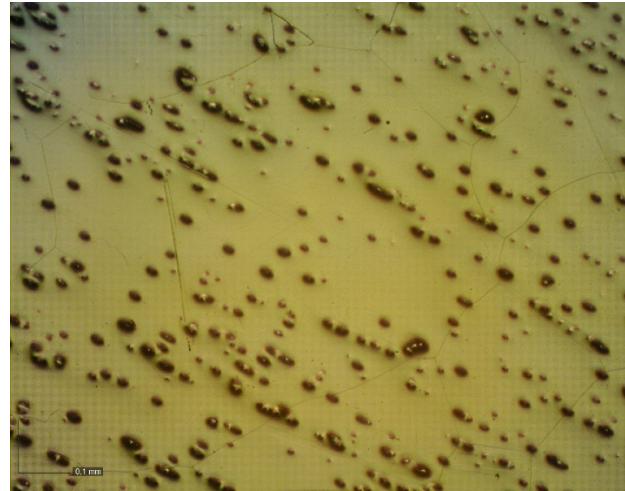
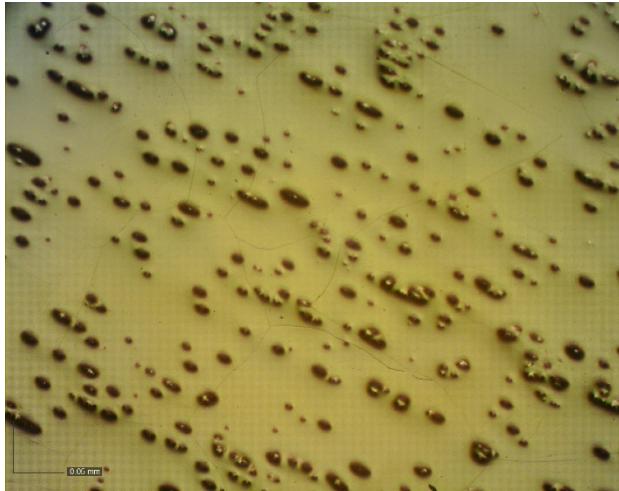
1.4.J. Inconel 625 con Ácidos mixtos



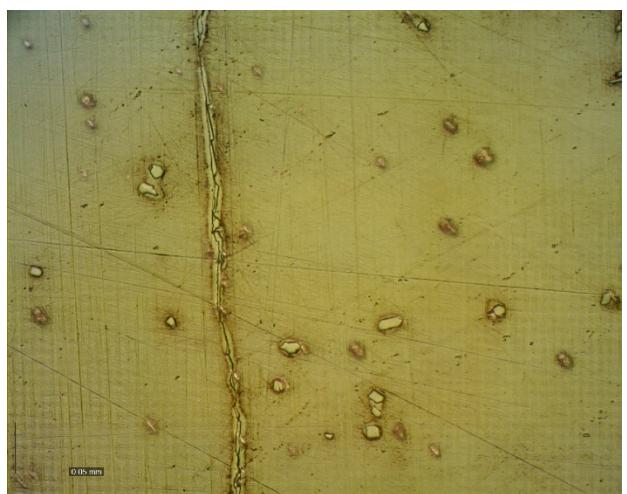
1.4.K. Inconel 601 con Glicerregia



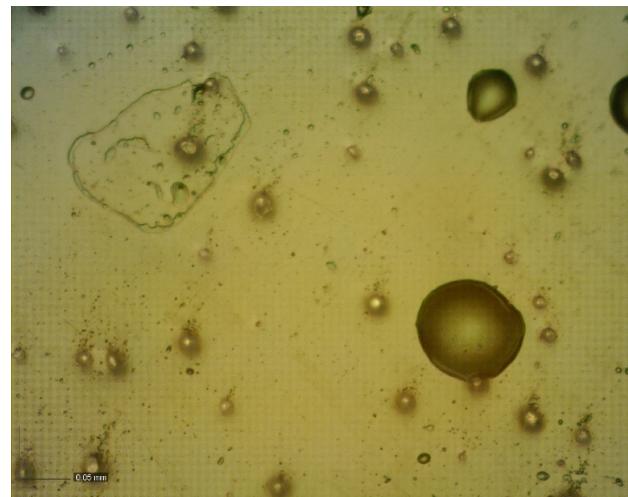
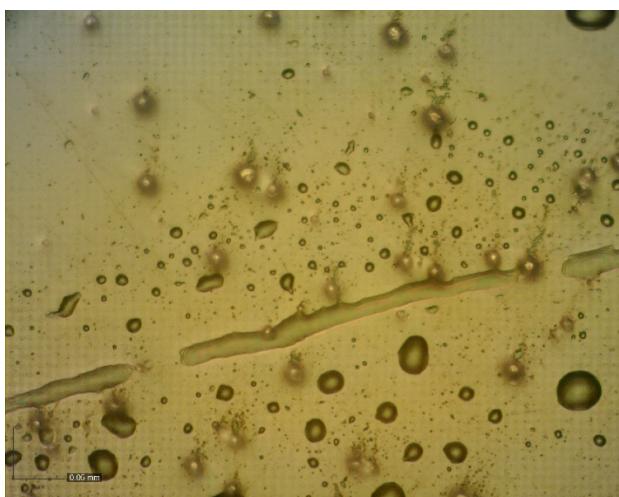
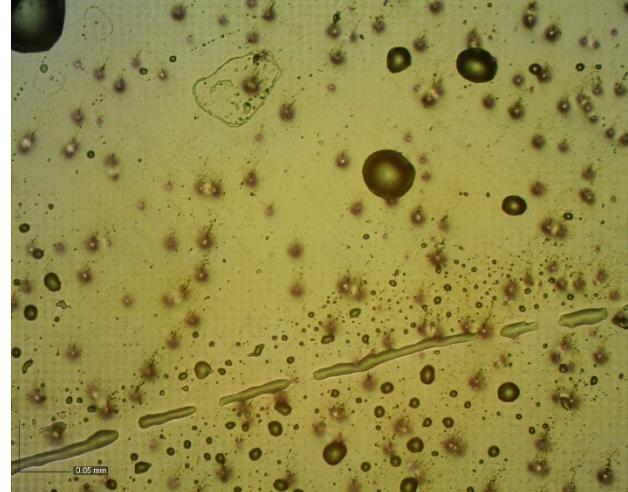
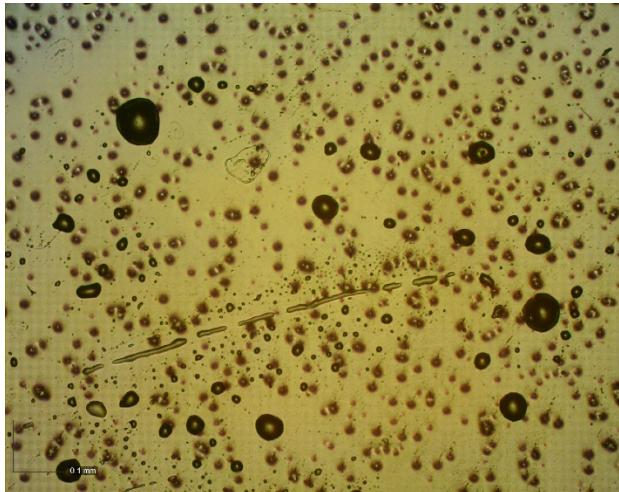
1.4.L. Inconel 617 OHM con Glicerregia



1.4.M. Inconel 617 SM con Glicerregia



1.4.N. Inconel 625 con Glicerregia



1.5 Cálculos de la preparación de los electrolitos

En este trabajo se han utilizado cuatro electrolitos diferentes: ácido nítrico, ácido clorhídrico, ácido sulfúrico y disolución acuosa de cloruro de sodio.

1.5.1. Ácido nítrico 0.3 Molar:

La concentración de la solución de ácido nítrico utilizada en la confección del electrolito es del 69%. A continuación, se hacen los cálculos para saber cuánta cantidad de solución debe haber en medio litro de disolución junto con agua destilada. Lo primero es saber las propiedades de la solución de ácido nítrico.

$$\rho(HNO_3) = 1.5129 \text{ g/cm}^3; \text{ masa}_O = 48 \text{ g/mol}; \text{ masa}_H = 1 \text{ g/mol}; \\ \text{masa}_N = 14 \text{ g/mol}; M = 0.3 \text{ Molar}$$

Ahora se calcula la masa de ácido nítrico necesaria en el medio litro de disolución.

$$M = \frac{\text{número de moles}}{\text{litros de disolución}} \Rightarrow \text{número de moles} = M \times \text{Litros de disolución} \\ n = 0.3 \times 0.5 = 0.15 \text{ moles de } HNO_3 \\ \text{masa molecular } HNO_3 = 1 + 14 + (16 \times 3) = 63 \text{ g/mol} \\ \text{masa } HNO_3 = 63 \times 0.15 = 9.45 \text{ g de } HNO_3$$

Una vez calculados los gramos, se halla el volumen de la solución de ácido nítrico necesario en la disolución.

$$\text{volumen puro} = \frac{\text{masa}}{\rho} = \frac{9.45}{1.5129} = 6.2463 \text{ ml de } HNO_3 \text{ puro}$$

$$\text{volumen real} = \frac{\text{volumen puro}}{\text{concentración}} = \frac{6.2463}{0.69} = 9.052 \text{ ml de } HNO_3 \text{ en 0.5L}$$

Son necesarios 9.05 mililitros de ácido nítrico en medio litro de disolución con agua destilada

1.5.2. Ácido clorhídrico 0.6 Molar:

La concentración de la solución de ácido clorhídrico utilizada es del 37%. A continuación, se hacen los cálculos para saber cuánta cantidad de solución debe haber en medio litro de disolución junto con agua destilada. Lo primero es saber las propiedades de la solución de ácido clorhídrico.

$$\rho(HCl) = 1.19 \text{ g/cm}^3; \text{ masa}_{Cl} = 35.45 \text{ g/mol}; \text{ masa}_H = 1 \text{ g/mol}; \\ M = 0.6 \text{ Molar}$$

Ahora se calcula la masa de ácido clorhídrico necesaria en el medio litro de disolución.

$$M = \frac{\text{número de moles}}{\text{litros de disolución}} \Rightarrow \text{número de moles} = M \times \text{Litros de disolución} \\ n = 0.6 \times 0.5 = 0.3 \text{ moles de } HCl \\ \text{masa molecular } HCl = 1 + 35.45 = 36.45 \text{ g/mol} \\ \text{masa } HCl = 36.45 \times 0.3 = 10.935 \text{ g de } HCl$$

Una vez calculados los gramos, se haya el volumen de la solución de ácido clorhídrico necesario en la disolución.

$$\text{volumen puro} = \frac{\text{masa}}{\rho} = \frac{10.935}{1.19} = 9.189 \text{ ml de } HCl \text{ puro}$$

$$\text{volumen real} = \frac{\text{volumen puro}}{\text{concentración}} = \frac{9.189}{0.37} = 24.84 \text{ ml de } HCl \text{ en 0.5L}$$

Son necesarios 24.84 mililitros de ácido clorhídrico en el medio litro de disolución con agua destilada.

1.5.3. Ácido sulfúrico 0.6 Molar:

La concentración de la solución de ácido sulfúrico utilizada es del 96%. A continuación, se hacen los cálculos para saber cuánta cantidad de solución debe haber en medio litro de disolución junto con agua destilada. Lo primero es saber las propiedades de la solución de ácido sulfúrico.

$$\rho(H_2SO_4) = 1.84 \text{ g/cm}^3; \text{ masa}_S = 36.064 \text{ g/mol}; \text{ masa}_H = 1 \text{ g/mol}; \\ \text{masa}_O = 16 \text{ g/mol}; M = 0.6 \text{ Molar}$$

Ahora se calcula la masa de ácido sulfúrico necesaria en el medio litro de disolución.

$$M = \frac{\text{número de moles}}{\text{litros de disolución}} \Rightarrow \text{número de moles} = M \times \text{Litros de disolución} \\ n = 0.6 \times 0.5 = 0.3 \text{ moles de } H_2SO_4 \\ \text{masa molecular } H_2SO_4 = 2 + 36.064 + (16 \times 4) = 102.064 \text{ g/mol} \\ \text{masa } H_2SO_4 = 102.064 \times 0.3 = 30.62 \text{ g de } H_2SO_4$$

Una vez calculados los gramos, se haya el volumen de la solución de ácido sulfúrico necesario en la disolución.

$$\text{volumen puro} = \frac{\text{masa}}{\rho} = \frac{30.62}{1.84} = 16.64 \text{ ml de } H_2SO_4 \text{ puro}$$

$$\boxed{\text{volumen real} = \frac{\text{volumen puro}}{\text{concentración}} = \frac{16.64}{0.96} = 17.33 \text{ ml de } H_2SO_4 \text{ en 0.5L}}$$

Son necesarios 17.33 mililitros de ácido sulfúrico en el medio litro de disolución con agua destilada.

1.5.4. Cloruro de sodio 0.6 Molar en agua destilada:

A continuación, se hacen los cálculos para saber cuánta cantidad de cloruro de sodio debe haber en medio litro de disolución junto con agua destilada. Lo primero es saber las propiedades del cloruro de sodio.

$$\text{masa}_{Cl} = 35.45 \text{ g/mol}; \text{masa}_{Na} = 22.99 \text{ g/mol}; \\ M = 0.6 \text{ Molar}$$

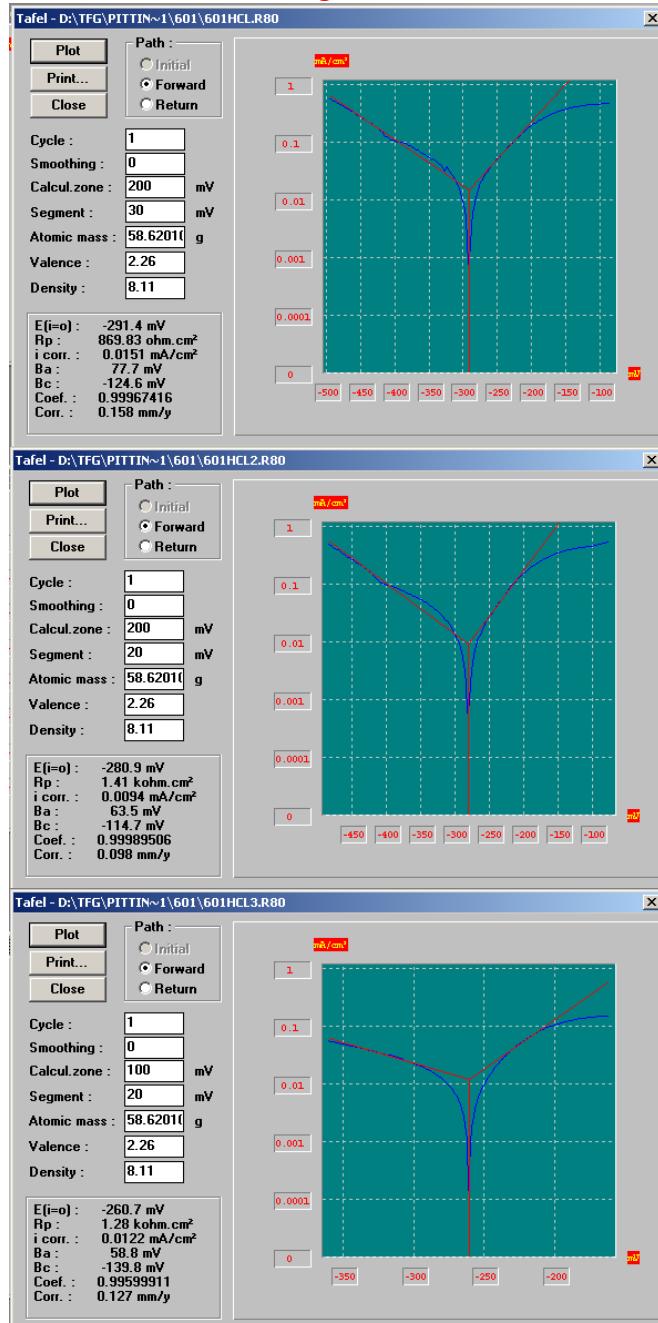
Ahora se calcula la masa de cloruro de sodio necesaria en el medio litro de disolución.

$$M = \frac{\text{número de moles}}{\text{litros de disolución}} \Rightarrow \text{número de moles} = M \times \text{Litros de disolución} \\ n = 0.6 \times 0.5 = 0.3 \text{ moles de NaCl} \\ \text{masa molecular HCl} = 22.99 + 35.45 = 58.44 \text{ g/mol} \\ \boxed{\text{masa NaCl} = 58.44 \times 0.3 = 17.53 \text{ g de NaCl}}$$

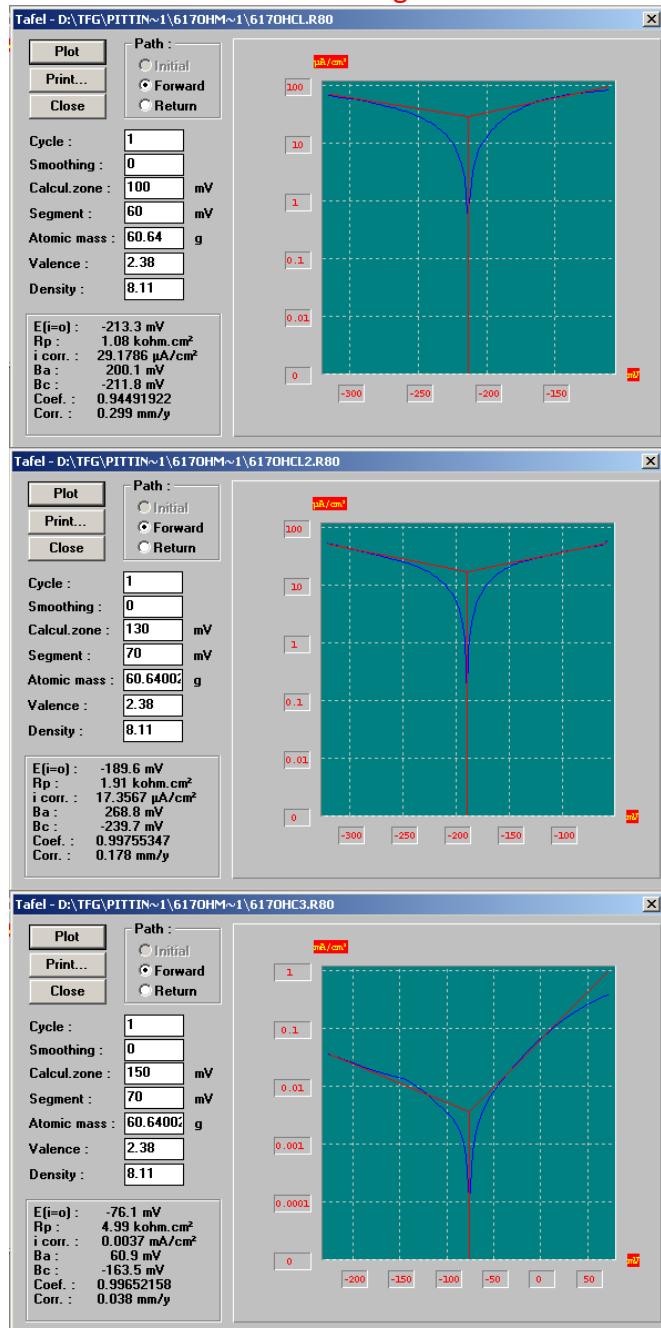
Son necesarios 17.53 gramos de cloruro de sodio en el medio litro de disolución con agua destilada.

1.6 Gráficas de aproximación de Tafel obtenidas con el VoltaMaster 1

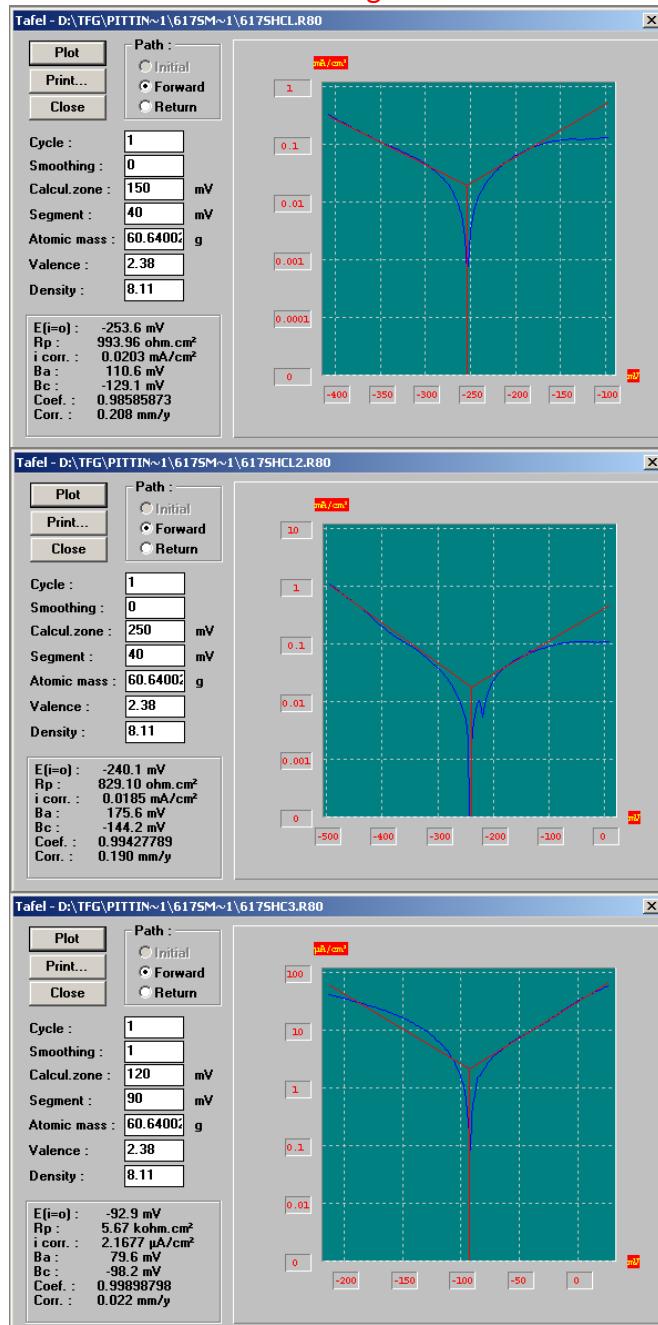
1.6.1. Inconel 601 Pitting corrosion HCl



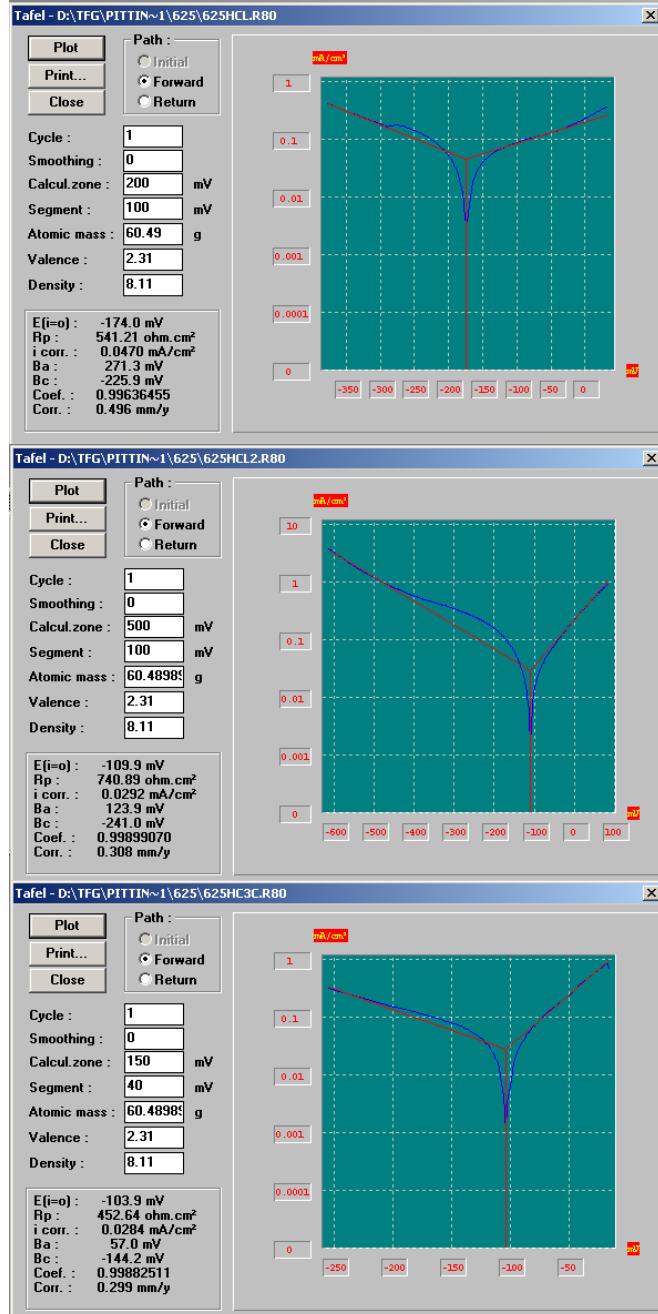
1.6.2. Inconel 617 OHM Pitting corrosion HCl



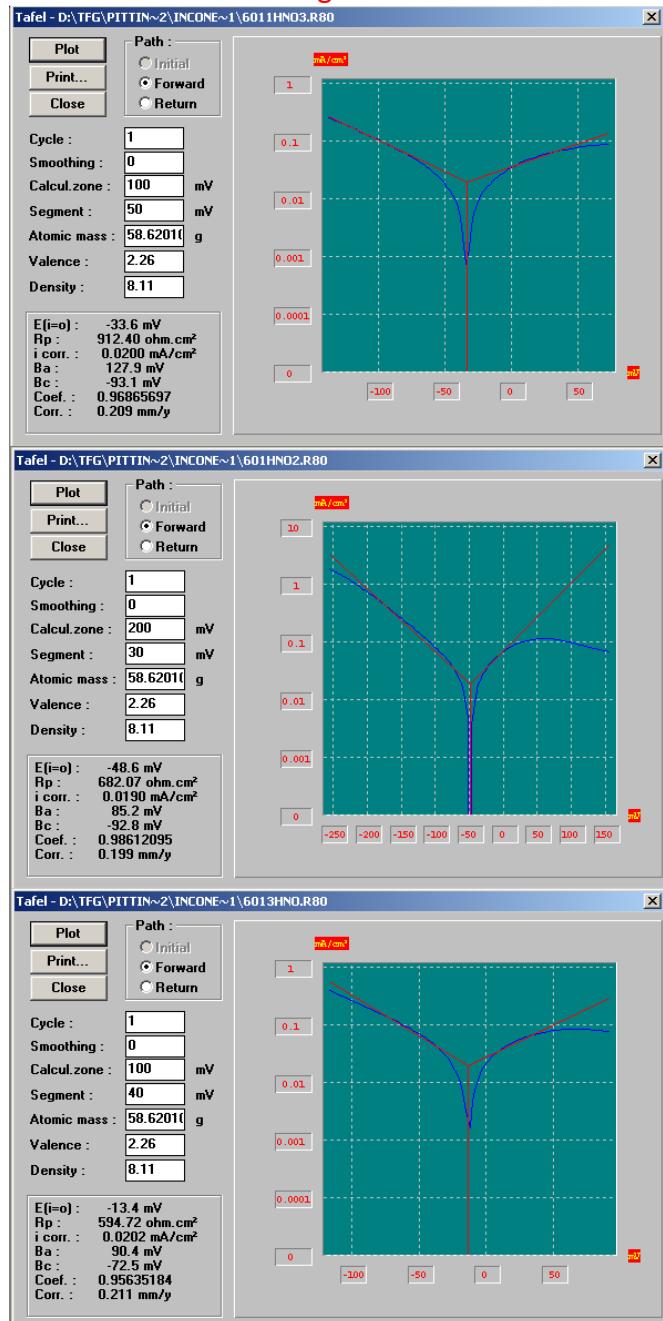
1.6.3. Inconel 617 SM Pitting corrosion HCl



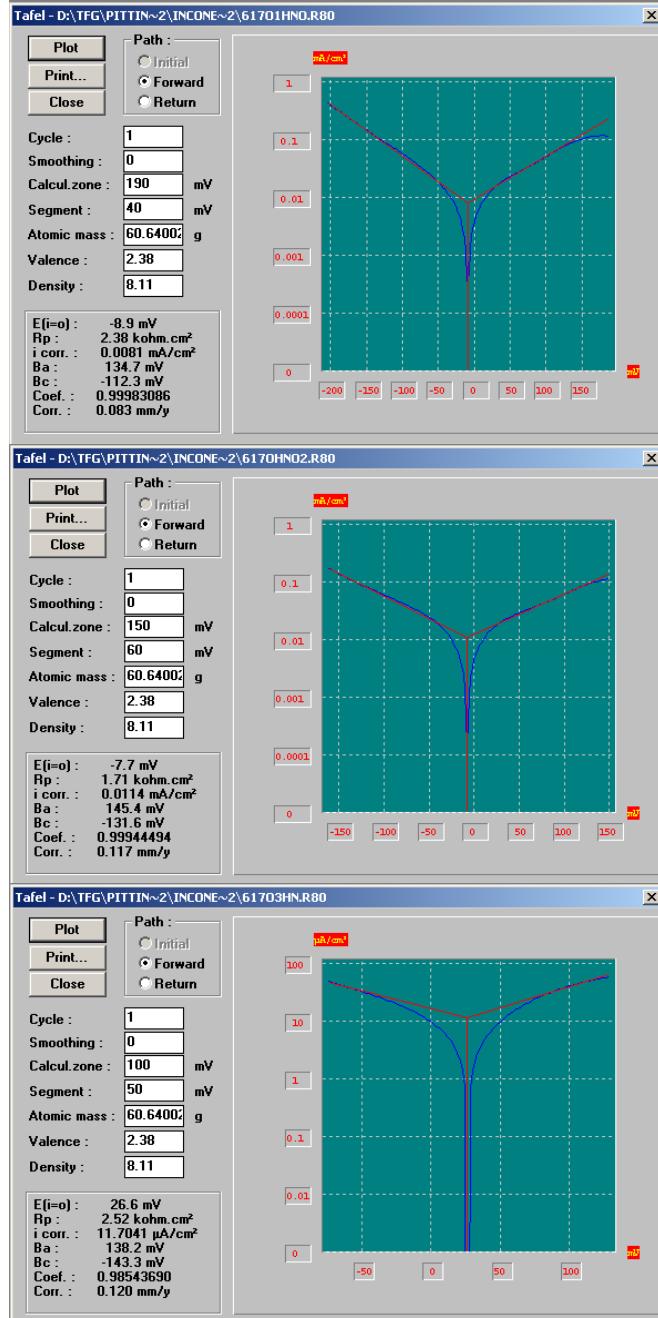
1.6.4. Inconel 625 Pitting corrosion HCl



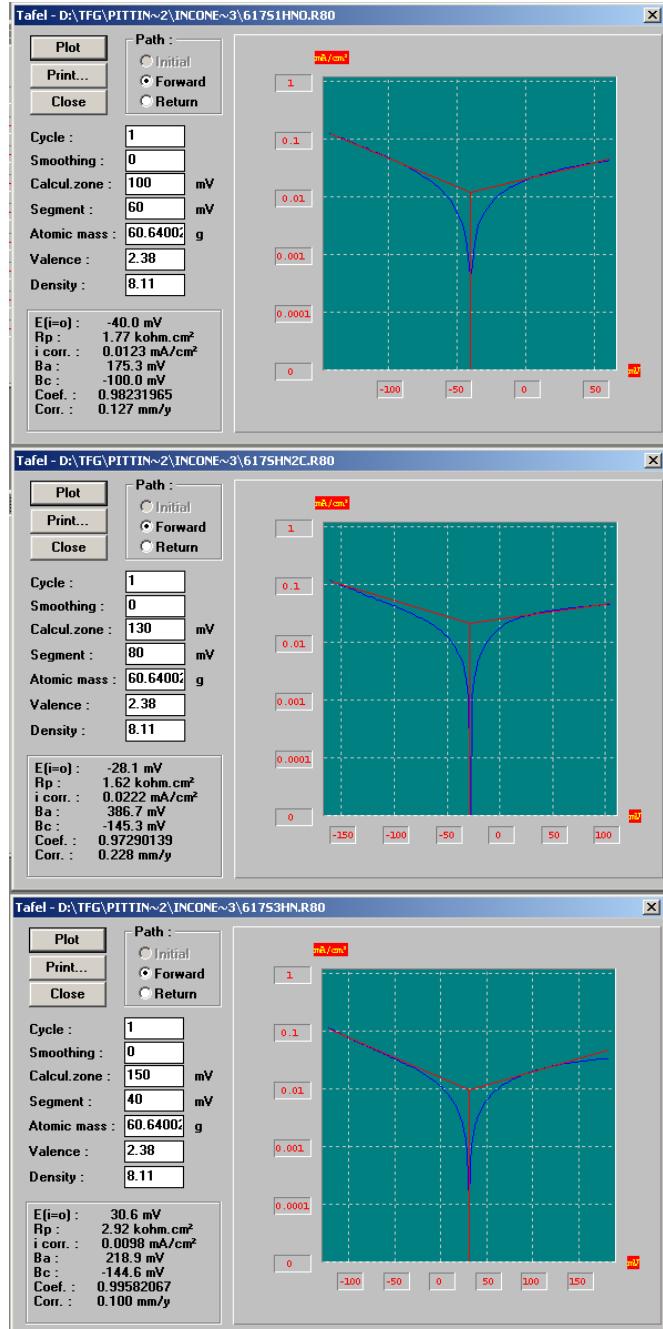
1.6.5. Inconel 601 Pitting corrosion HNO₃



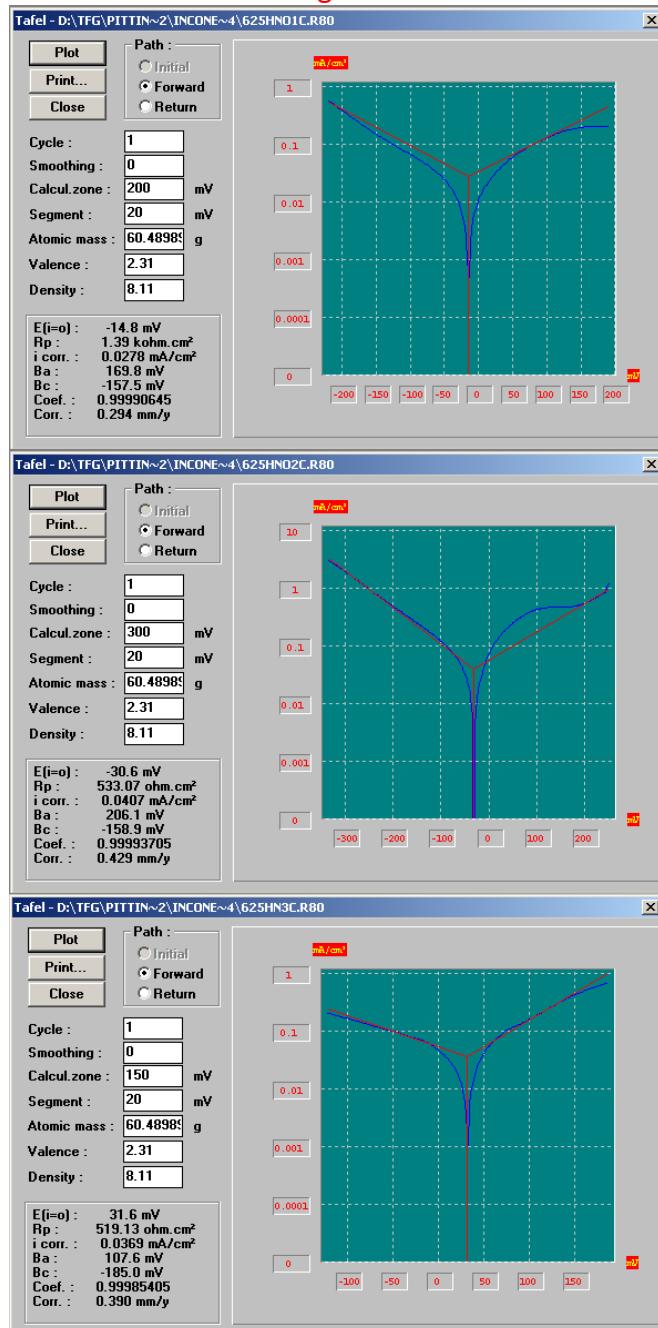
1.6.6. Inconel 617 OHM Pitting corrosion HNO₃



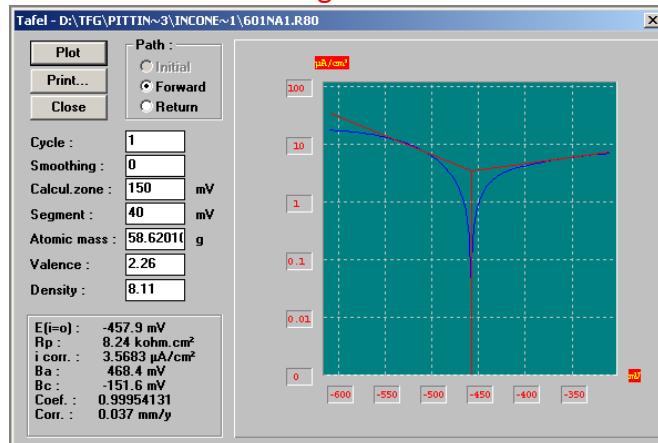
1.6.7. Inconel 617 SM Pitting corrosion HNO₃



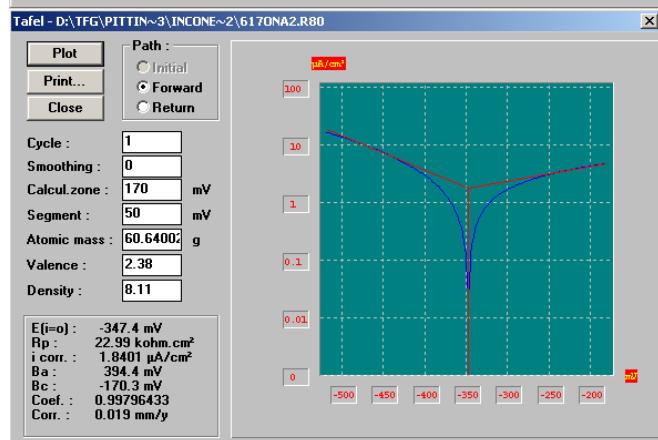
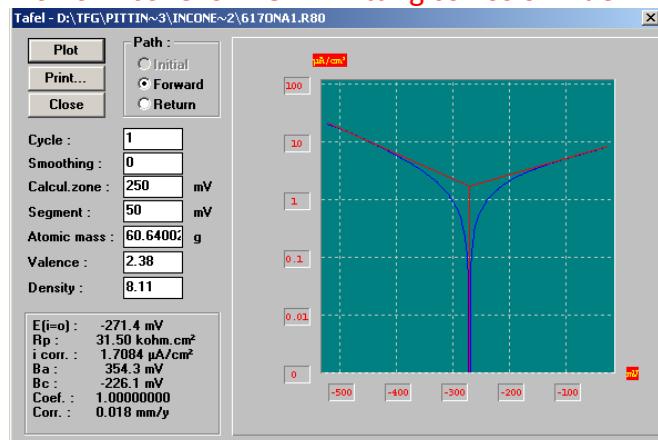
1.6.8. Inconel 625 Pitting corrosion HNO₃



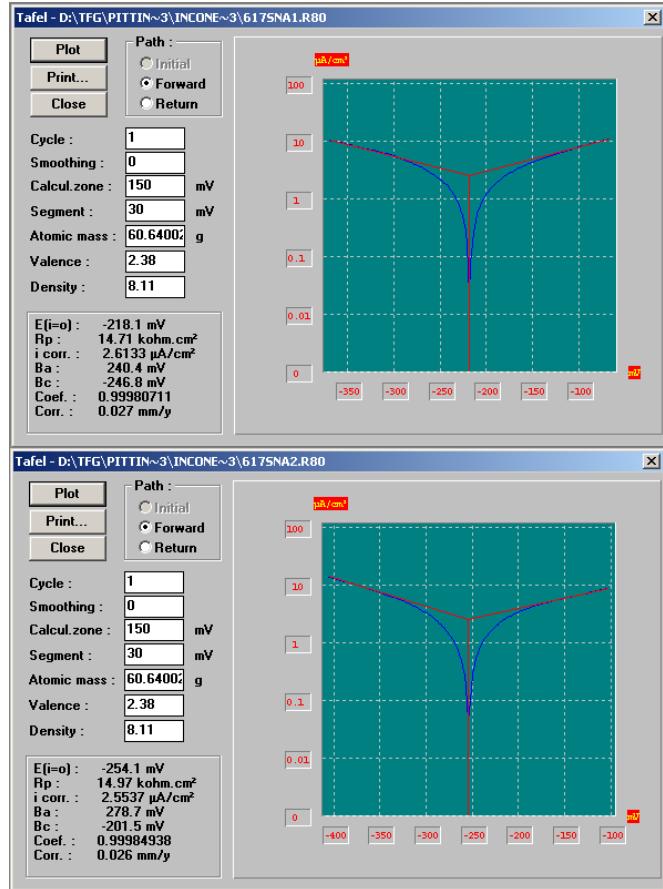
1.6.9. Inconel 601 Pitting corrosion NaCl



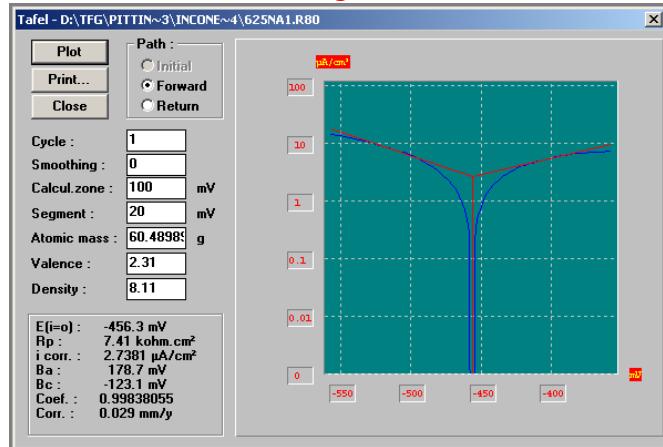
1.6.10. Inconel 617 OHM Pitting corrosion NaCl

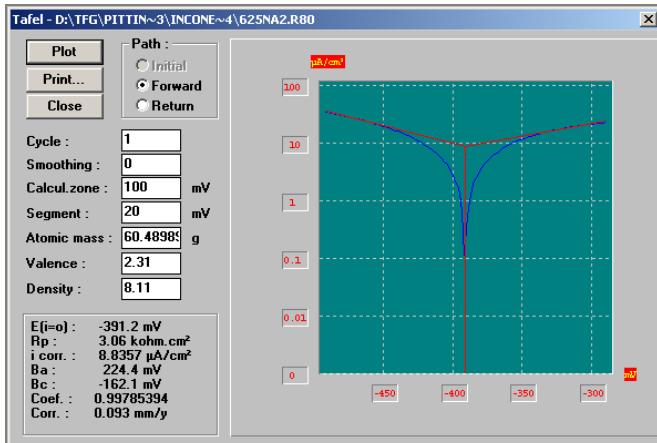


1.6.11. Inconel 617 SM Pitting corrosion NaCl

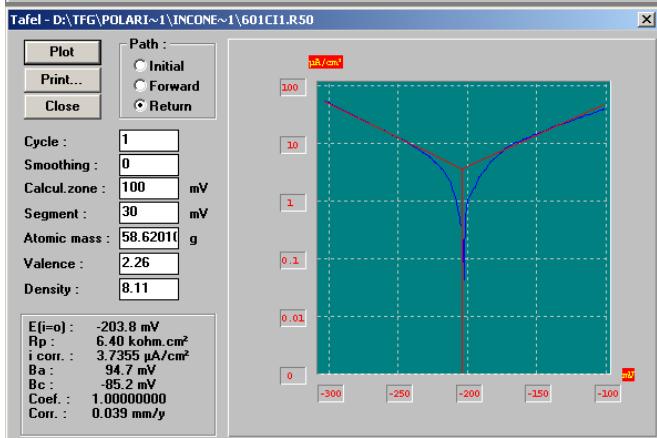
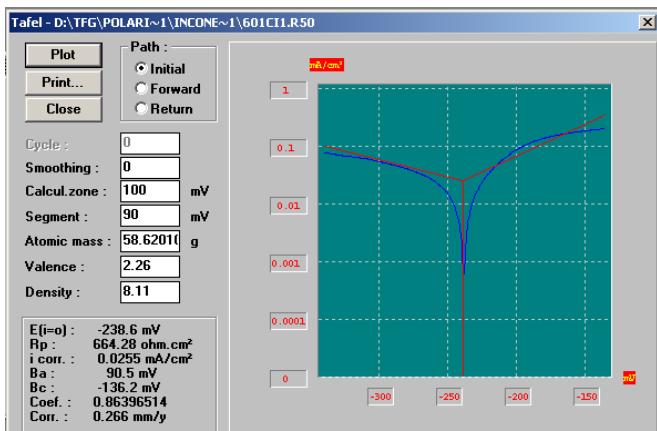


1.6.12. Inconel 625 Pitting corrosion NaCl

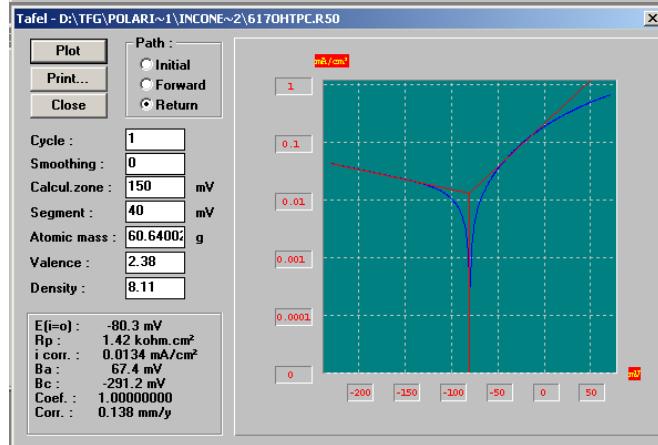
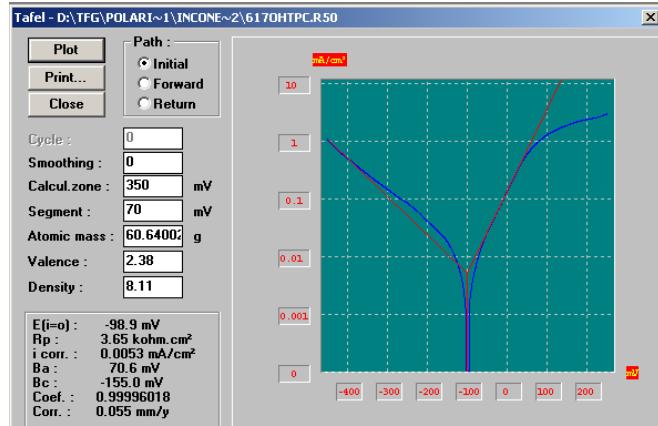




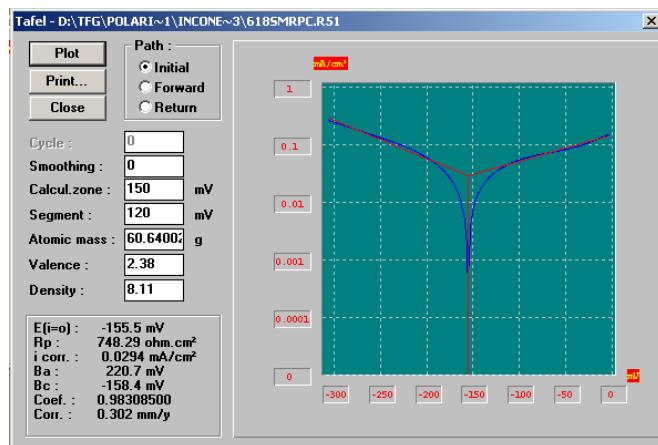
1.6.13. Inconel 601 Polarización cíclica HCl

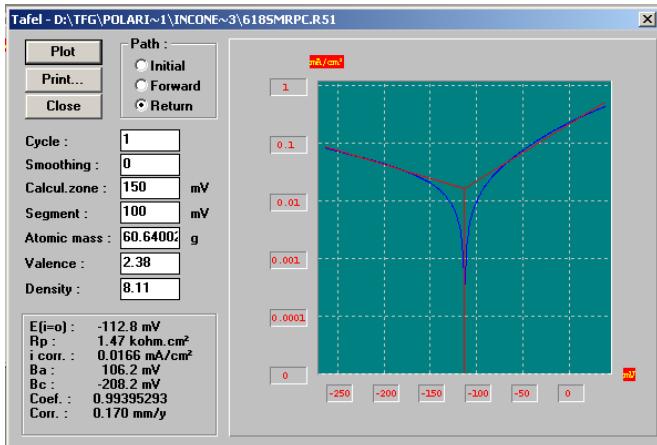


1.6.14. Inconel 617 OHM Polarización cíclica HCl

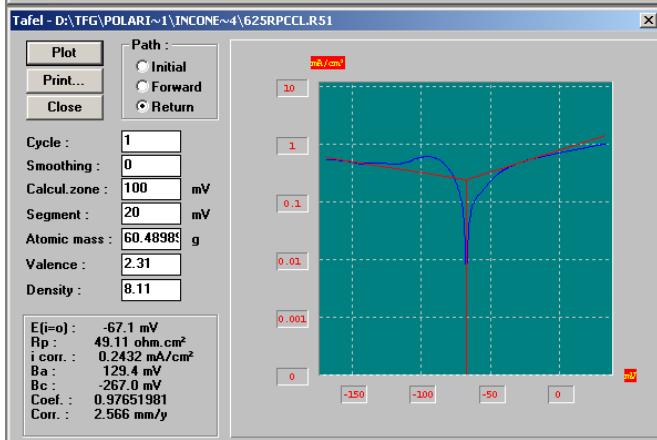
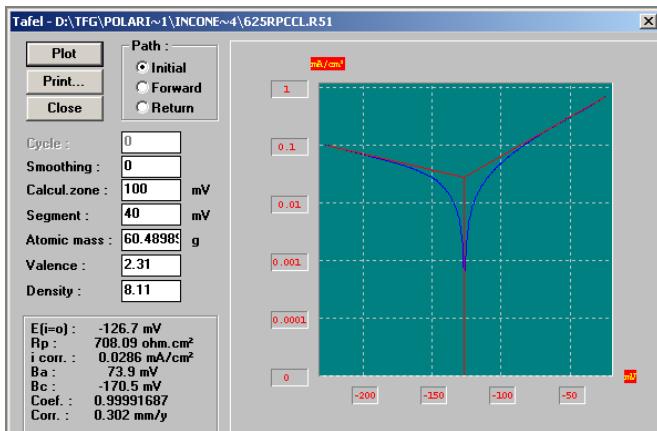


1.6.15. Inconel 617 SM Polarización cíclica HCl

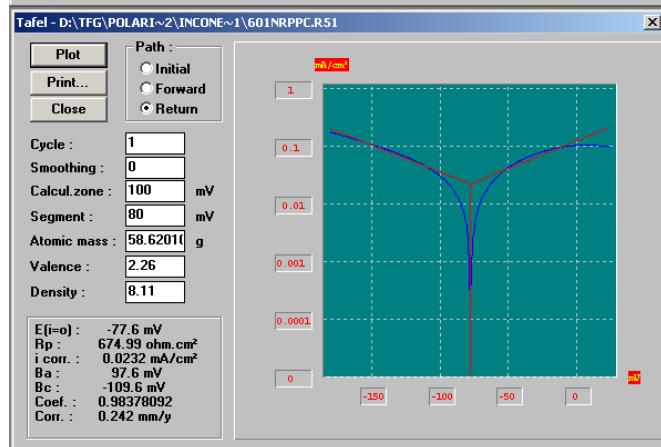
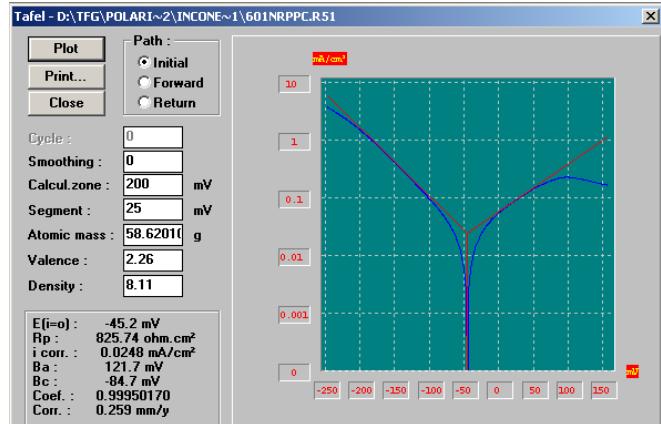




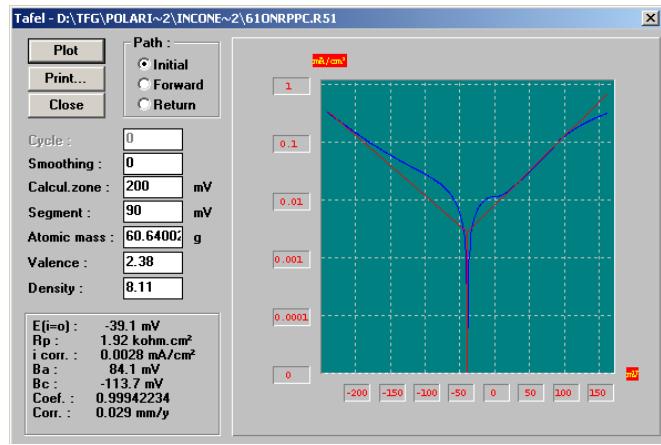
1.6.16. Inconel 625 Polarización cíclica HCl

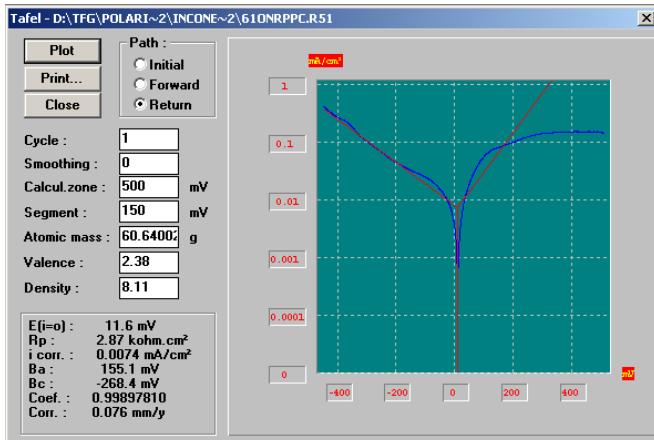


1.6.17. Inconel 601 Polarización cíclica HNO₃

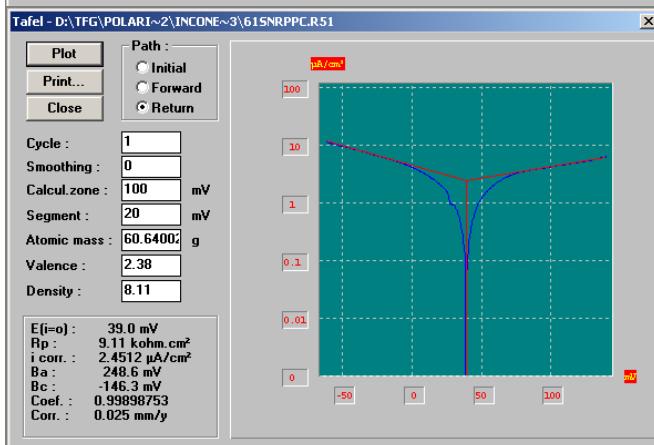
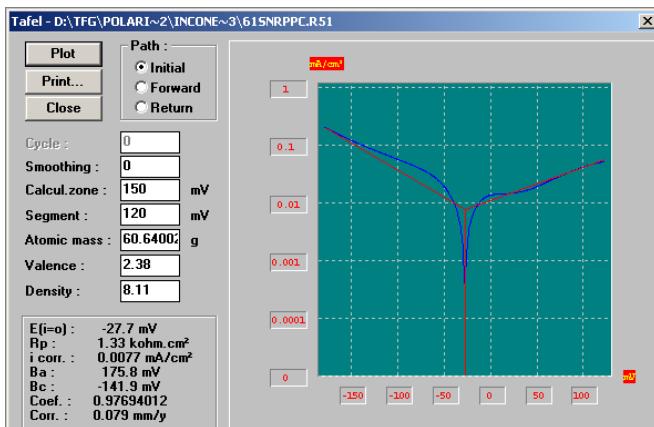


1.6.18. Inconel 617 OHM Polarización cíclica HNO₃

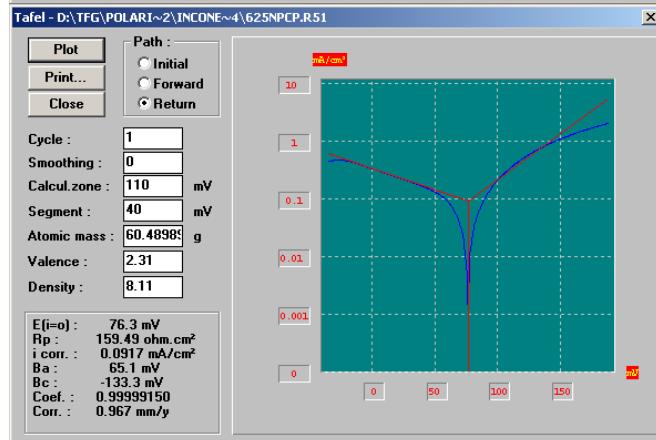
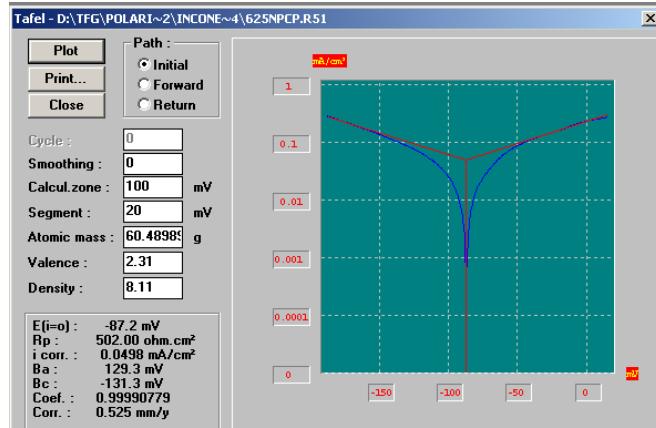




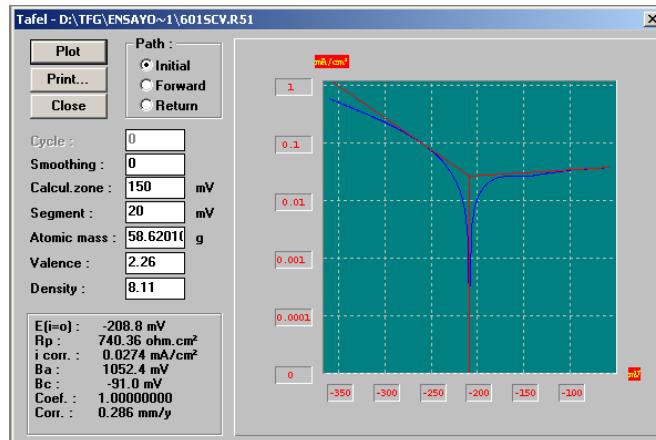
1.6.19. Inconel 617 SM Polarización cíclica HNO₃

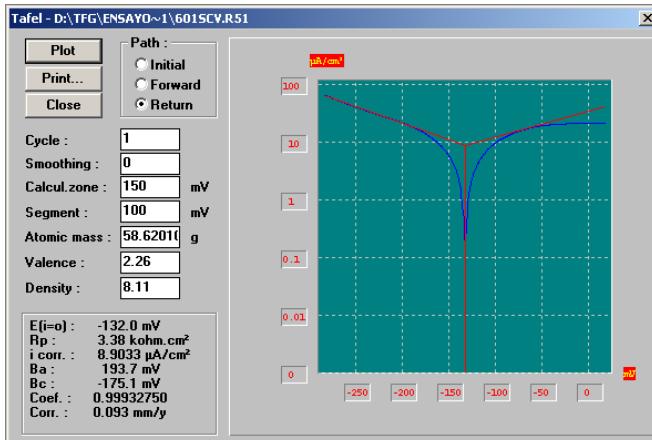


1.6.20. Inconel 625 Polarización cíclica HNO₃

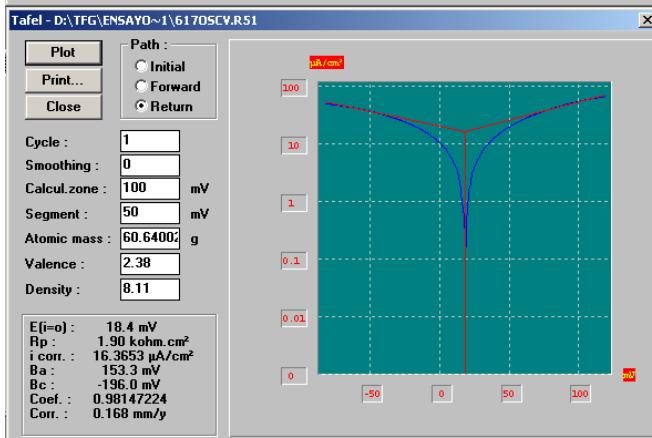
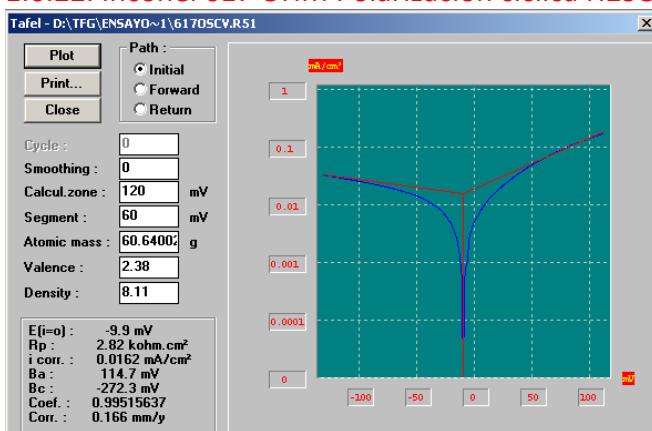


1.6.21. Inconel 601 Polarización cíclica H₂SO₄

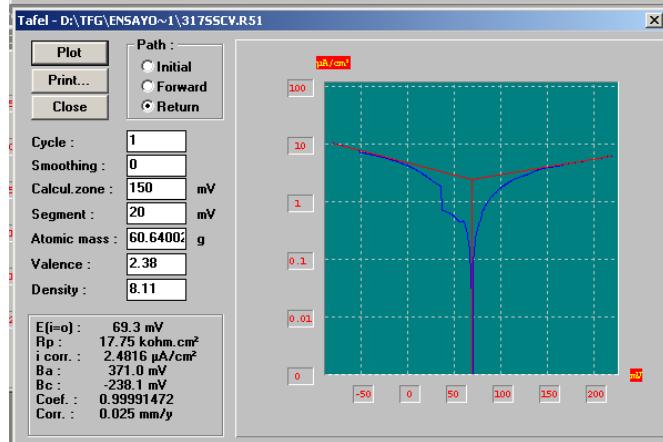
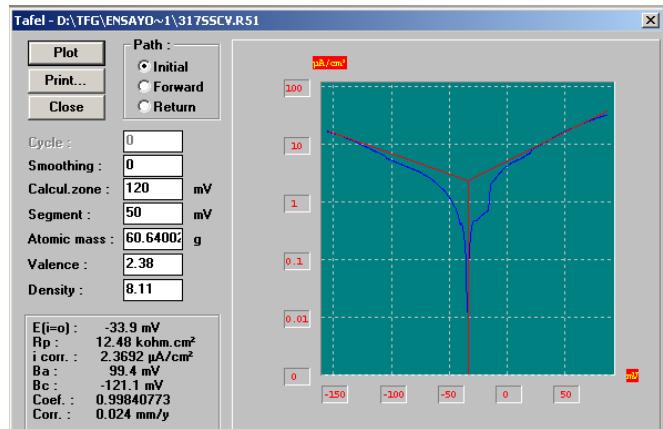




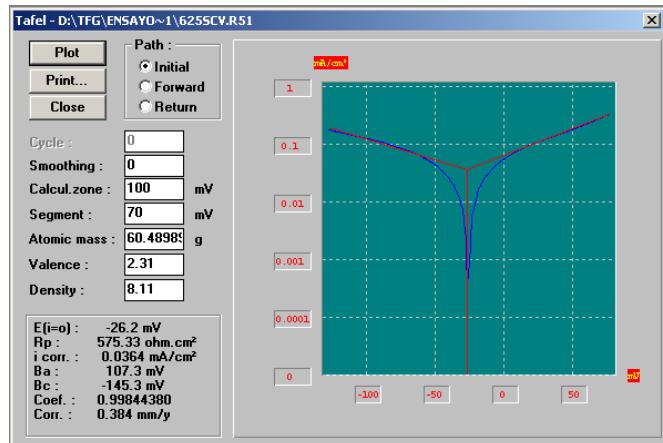
1.6.22. Inconel 617 OHM Polarización cíclica H₂SO₄

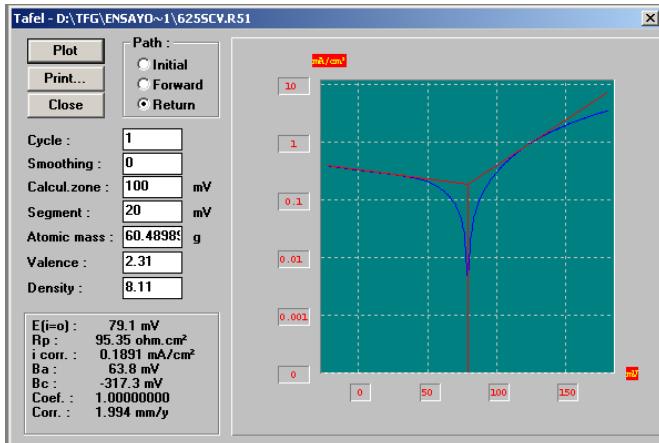


1.6.23. Inconel 617 SM Polarización cíclica H₂SO₄

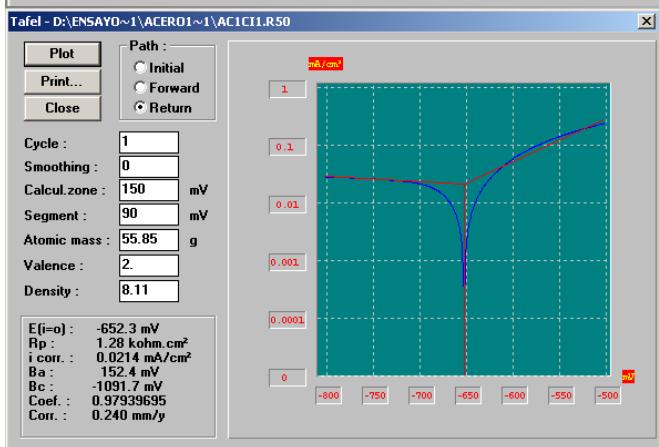
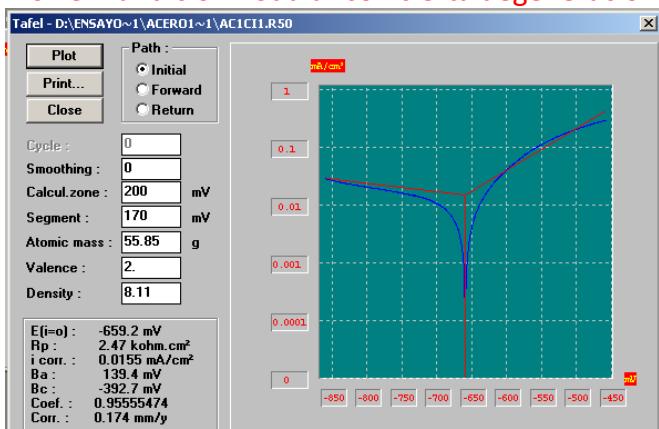


1.6.24. Inconel 625 Polarización cíclica H₂SO₄

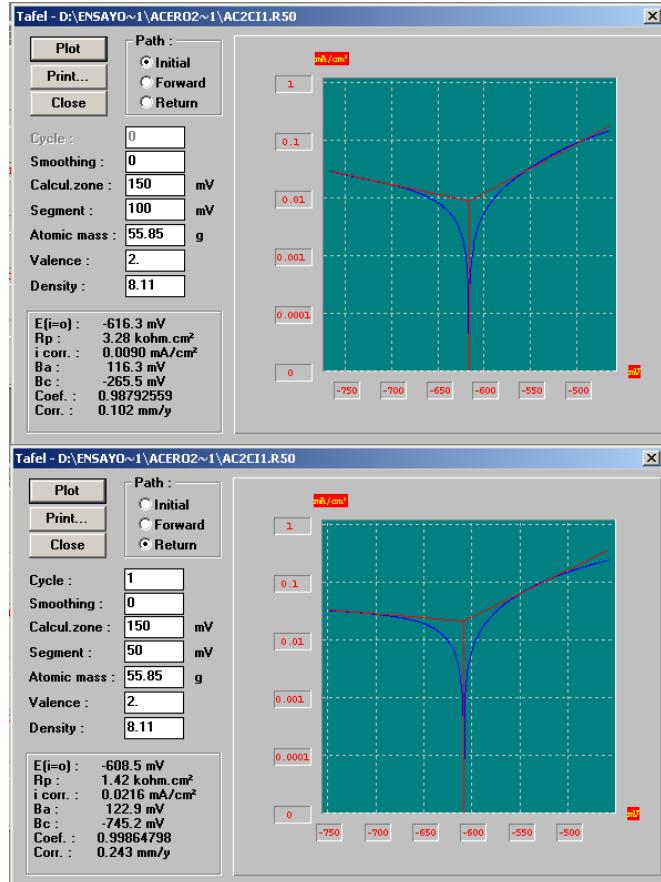




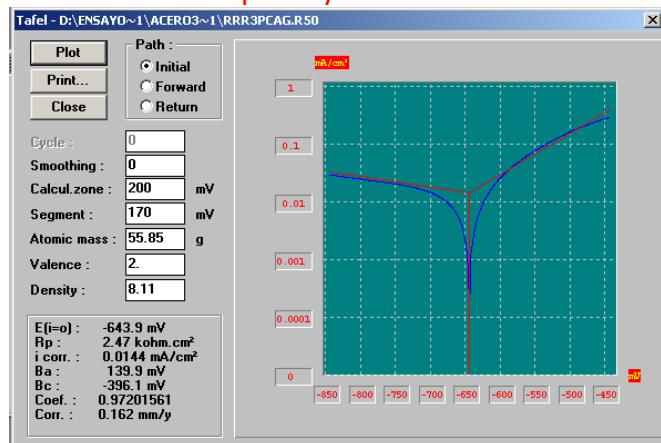
1.6.25. Fundición nodular con cierta degeneración Polarización cíclica Agua potable

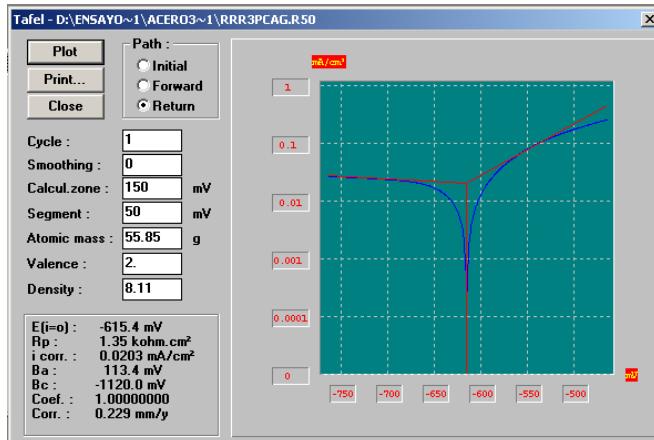


1.6.26. Acero ferrito-perlítico de medio-alto carbono Polarización cíclica Agua potable

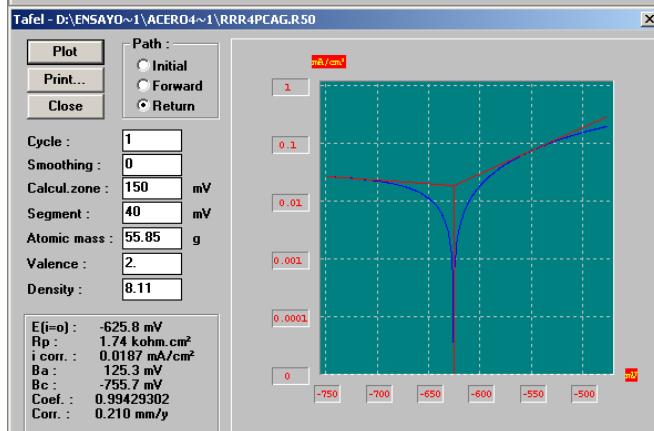
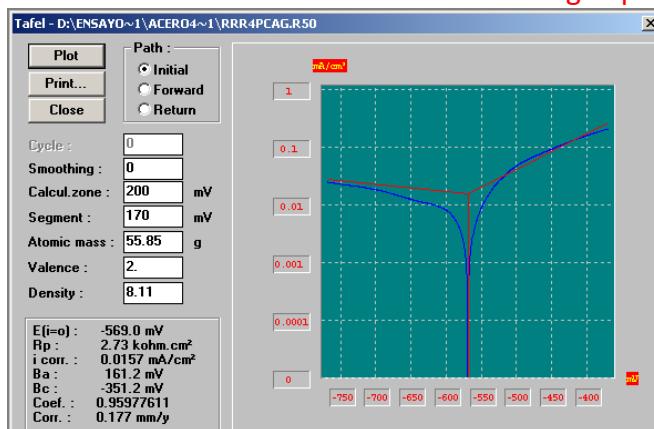


1.6.27. Acero templado y revenido Polarización cíclica Agua potable



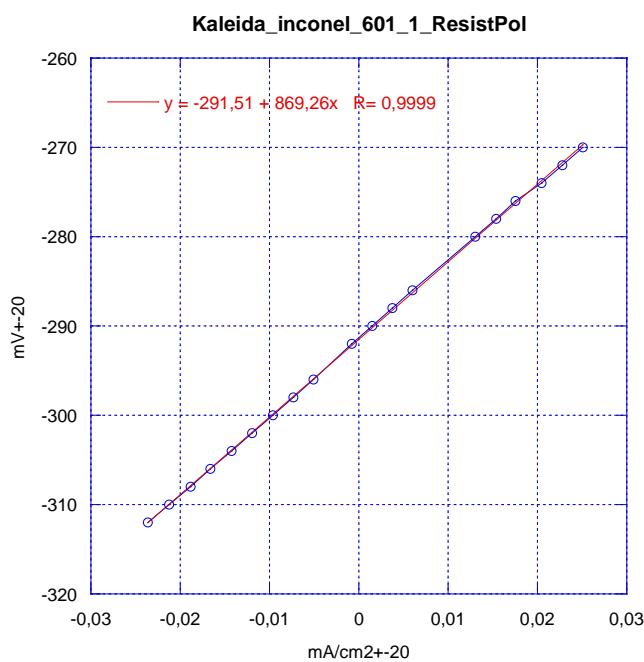
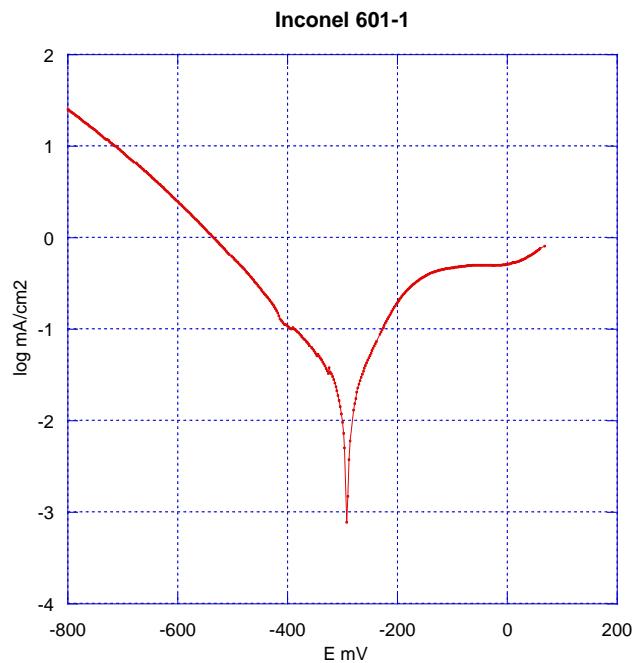


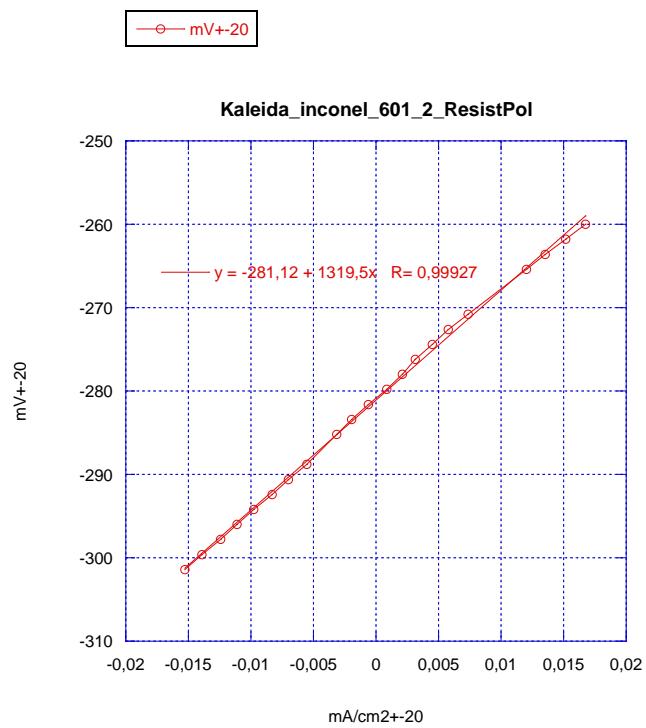
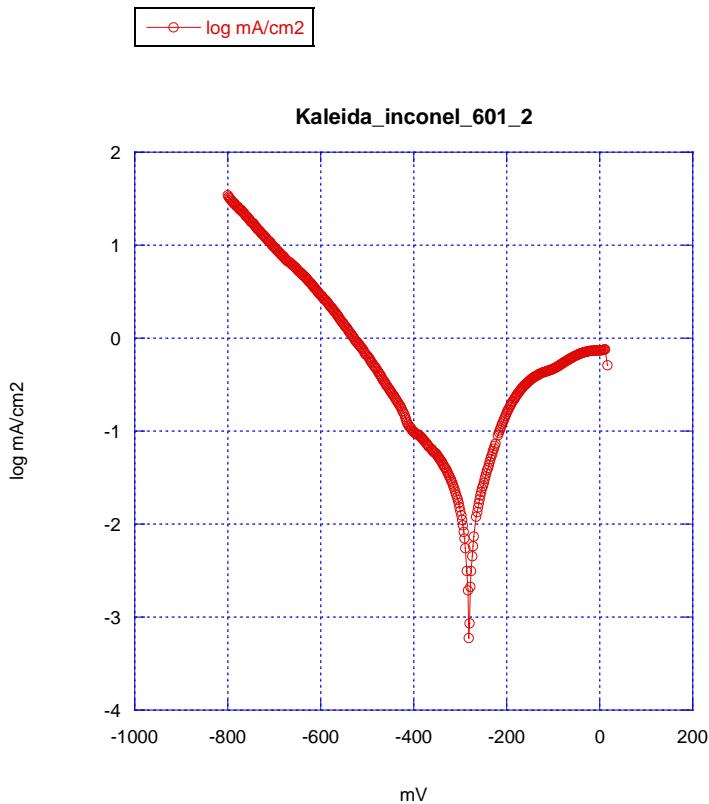
1.6.28. Acero ferrítico Polarización cíclica Agua potable

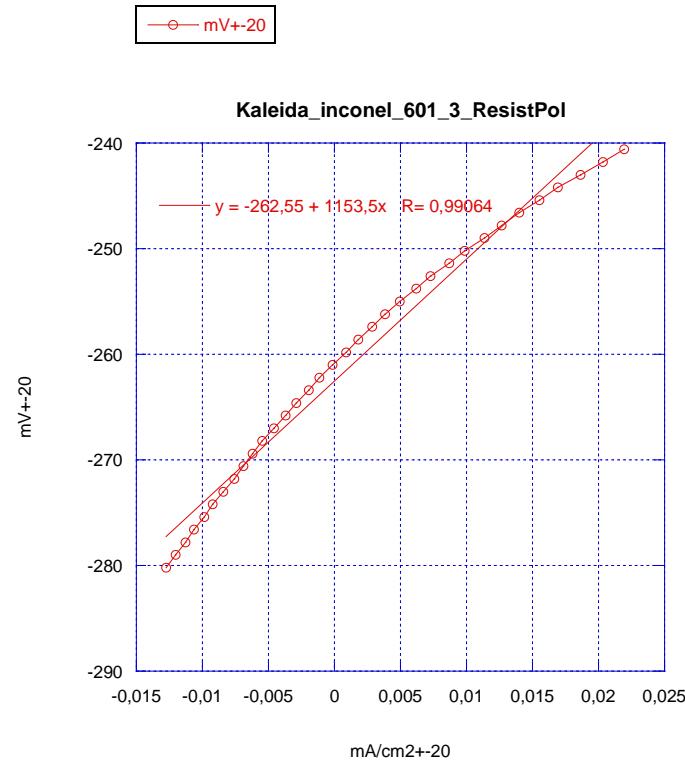
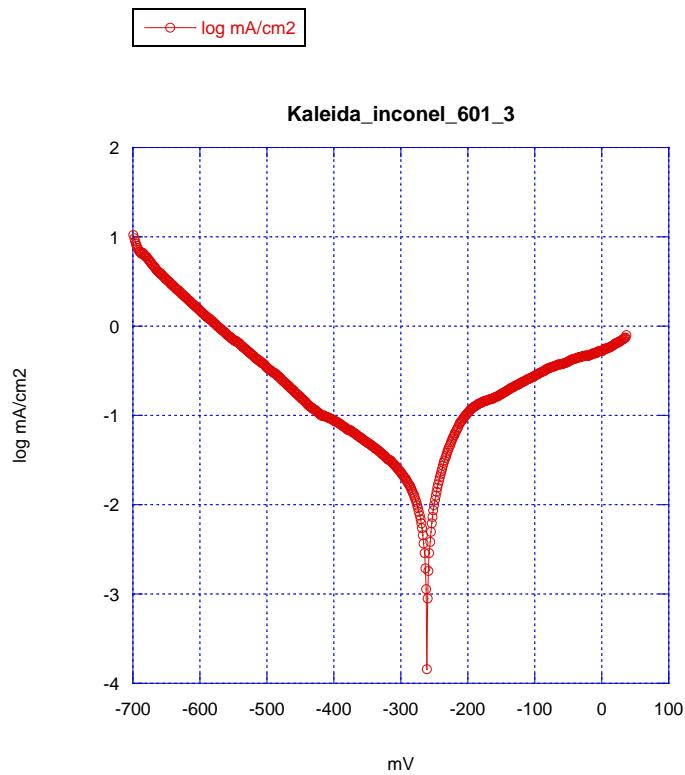


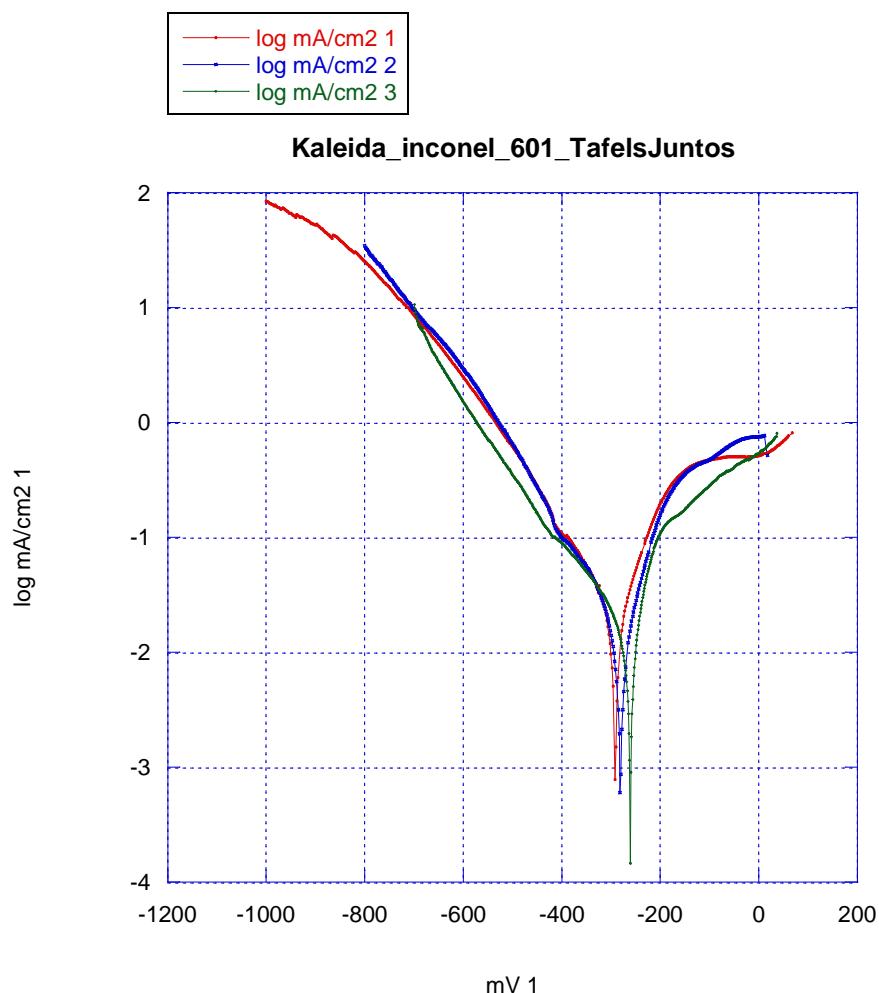
1.7 Gráficas realizadas con el programa Kaleidagraph

1.7.1. Inconel 601 Pitting corrosion HCl

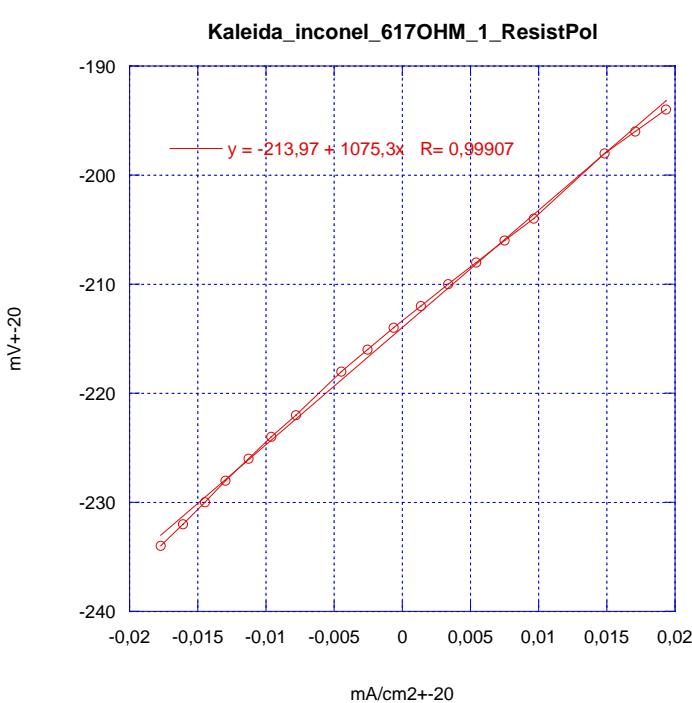
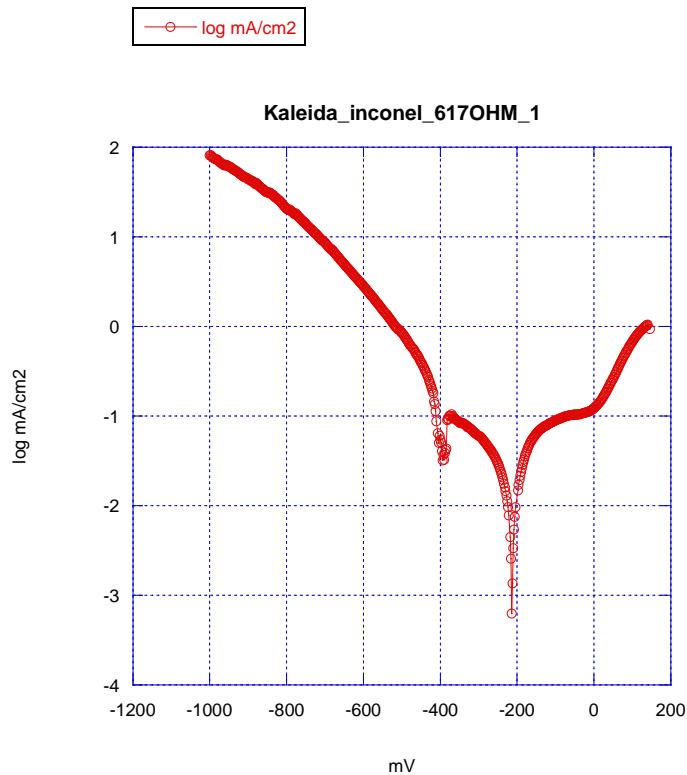


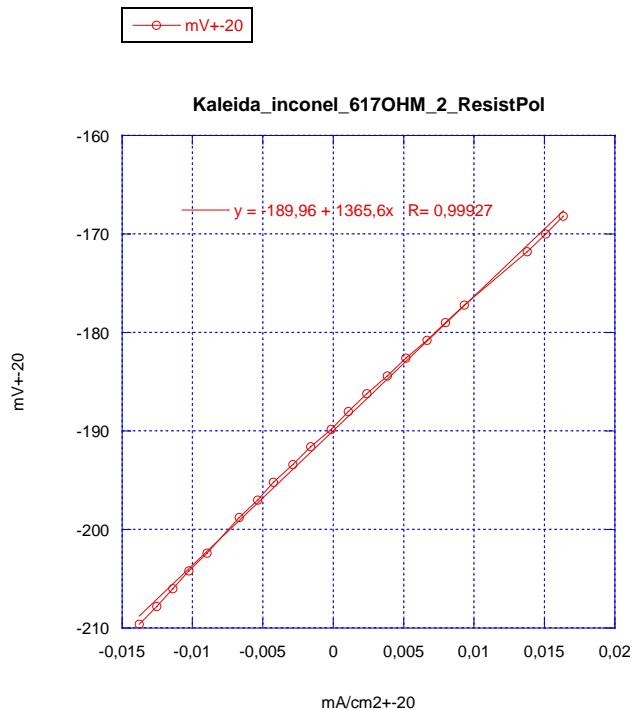
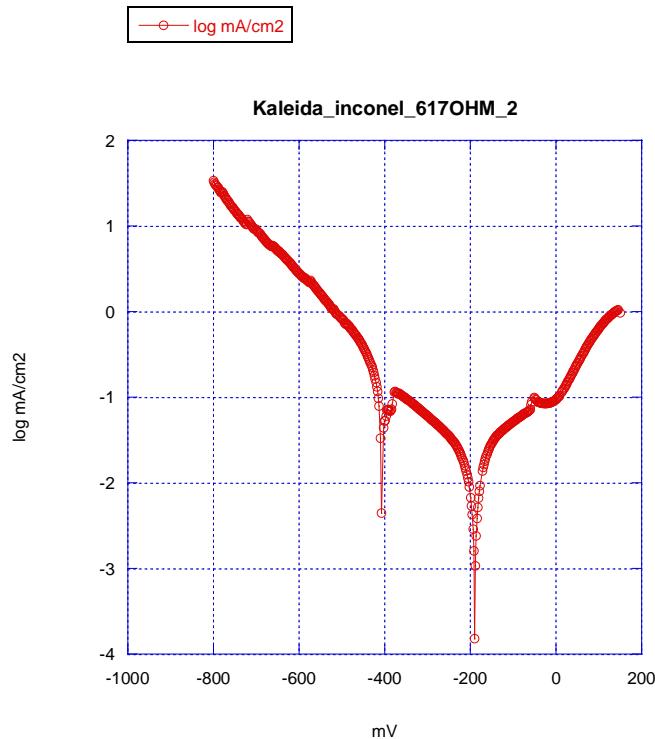


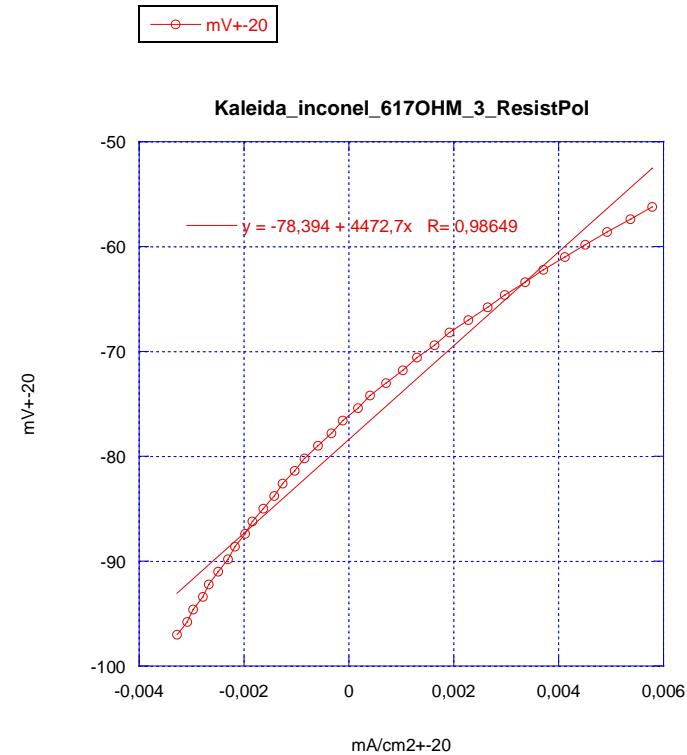
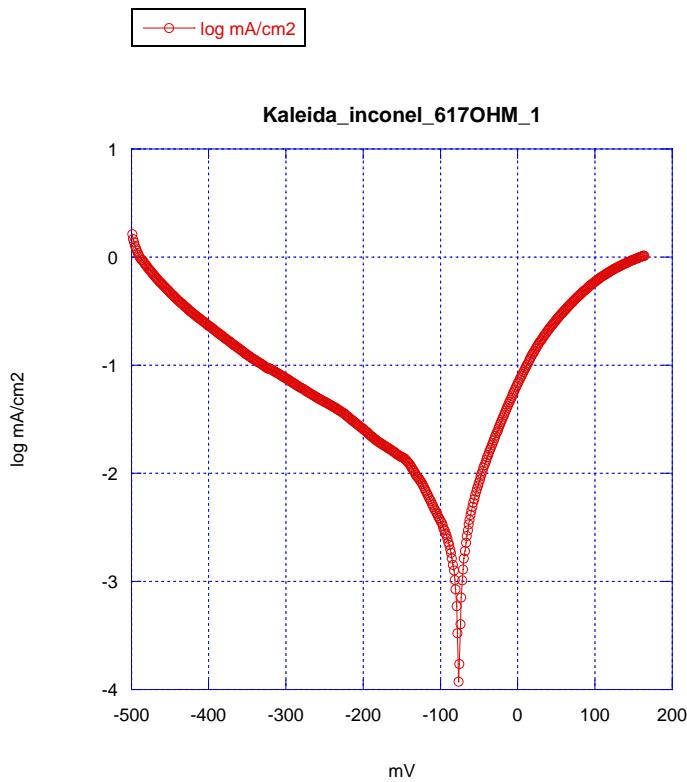


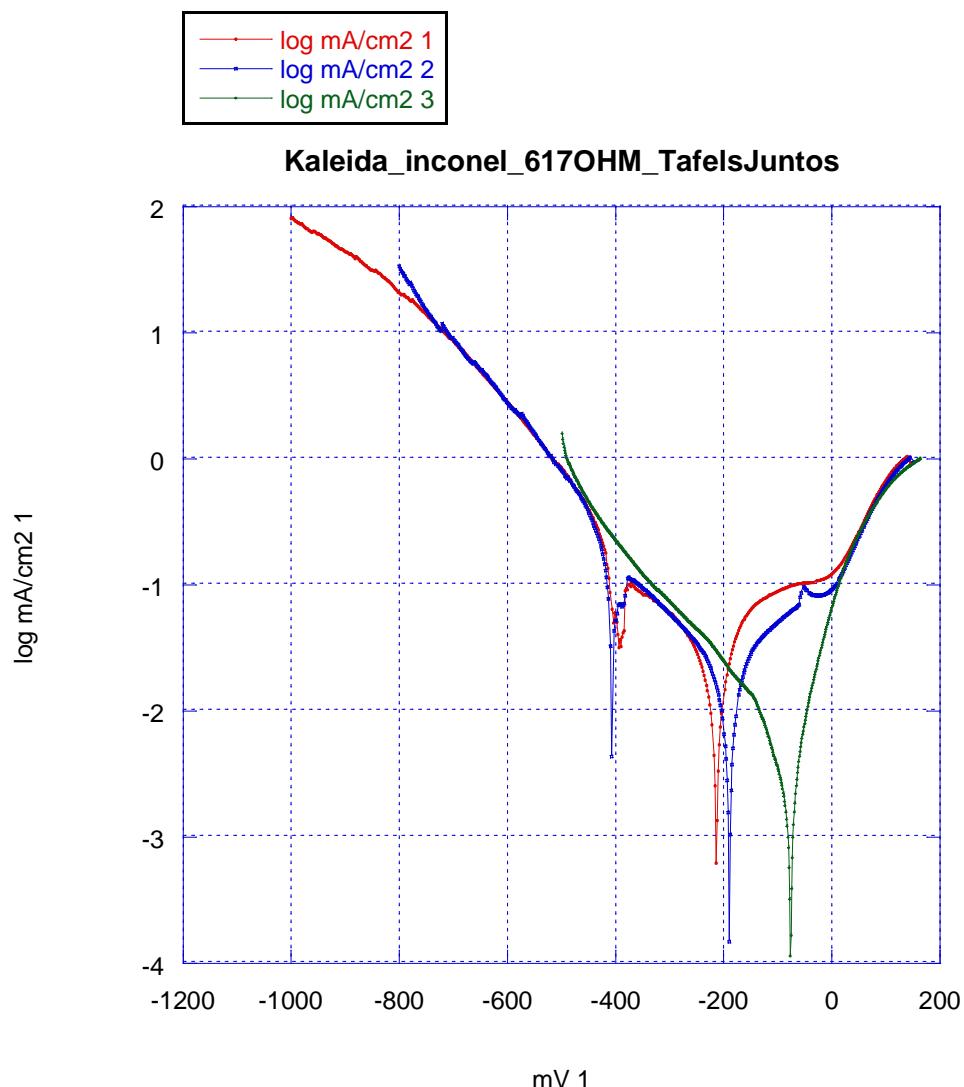


1.7.2. Inconel 617 OHM Pitting corrosion HCl

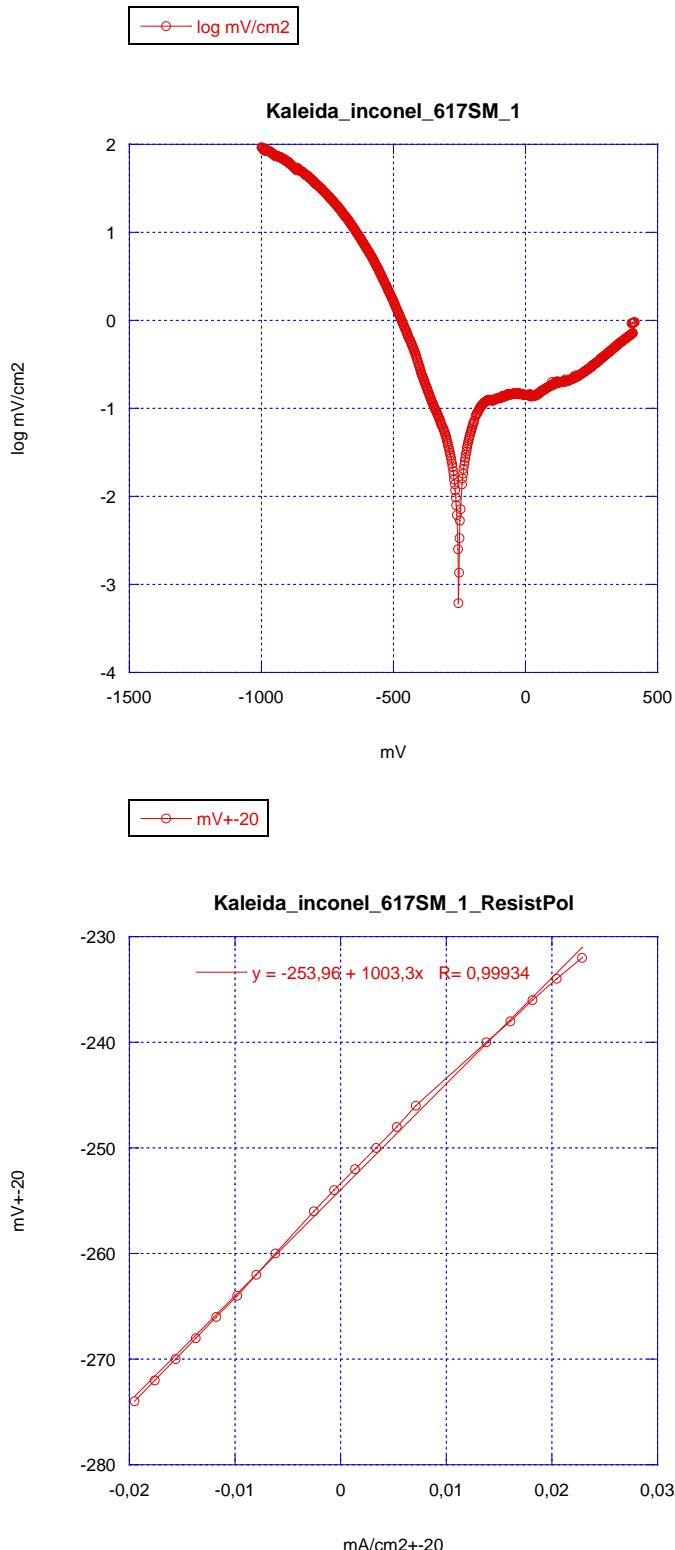


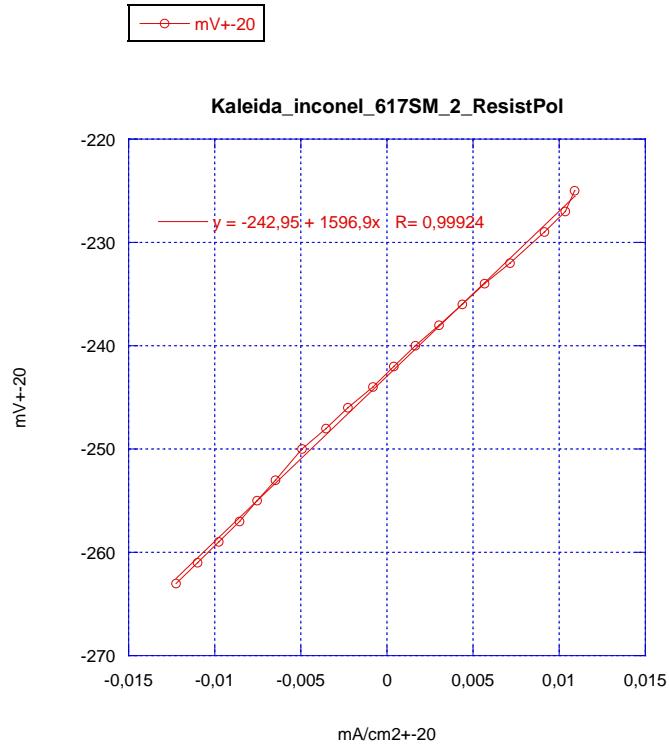
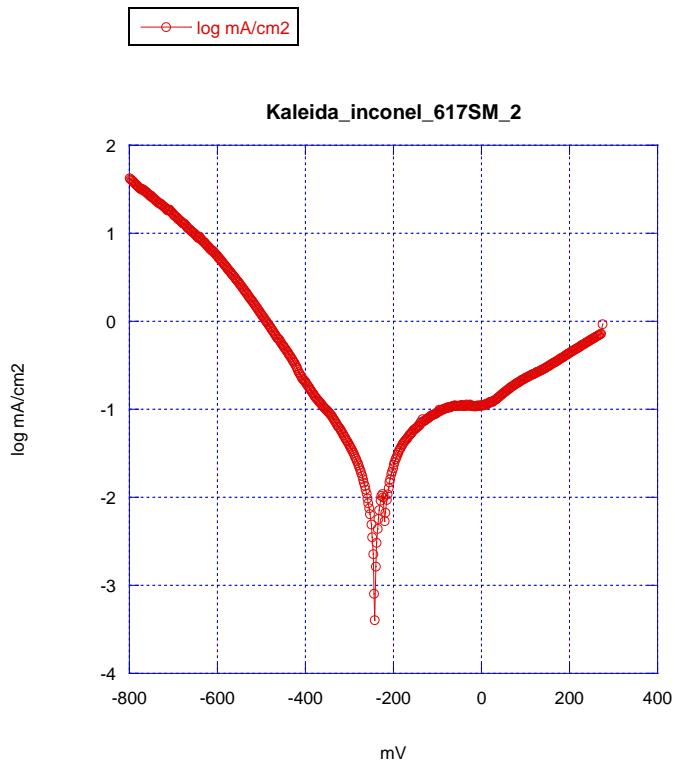


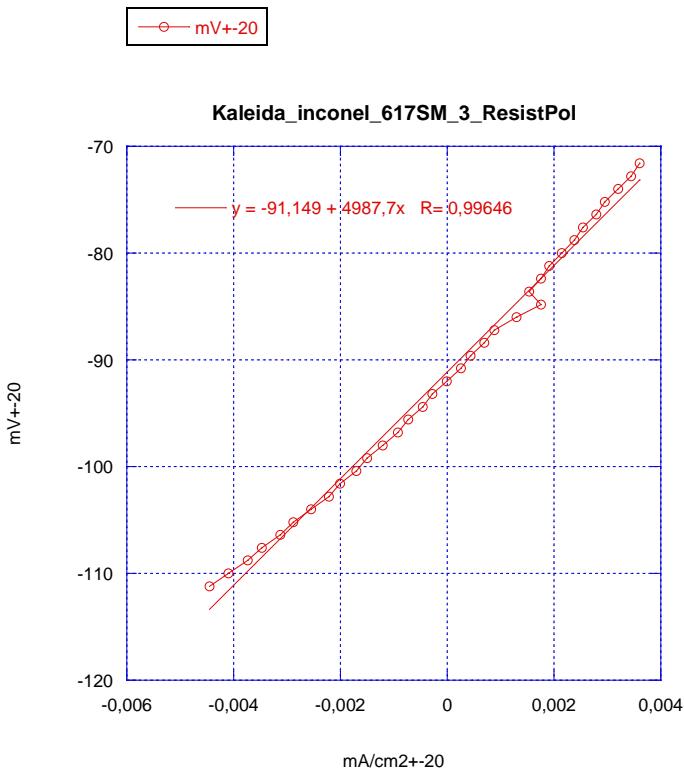
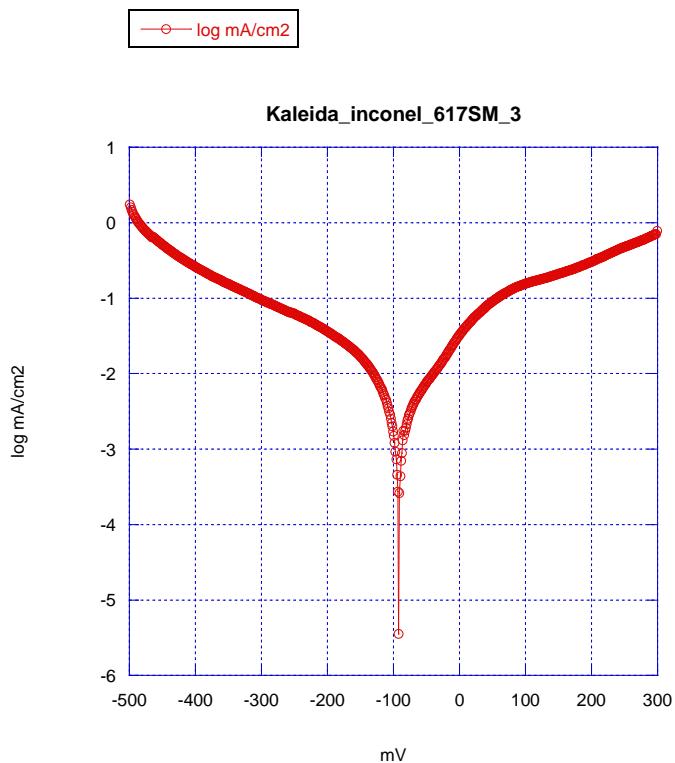


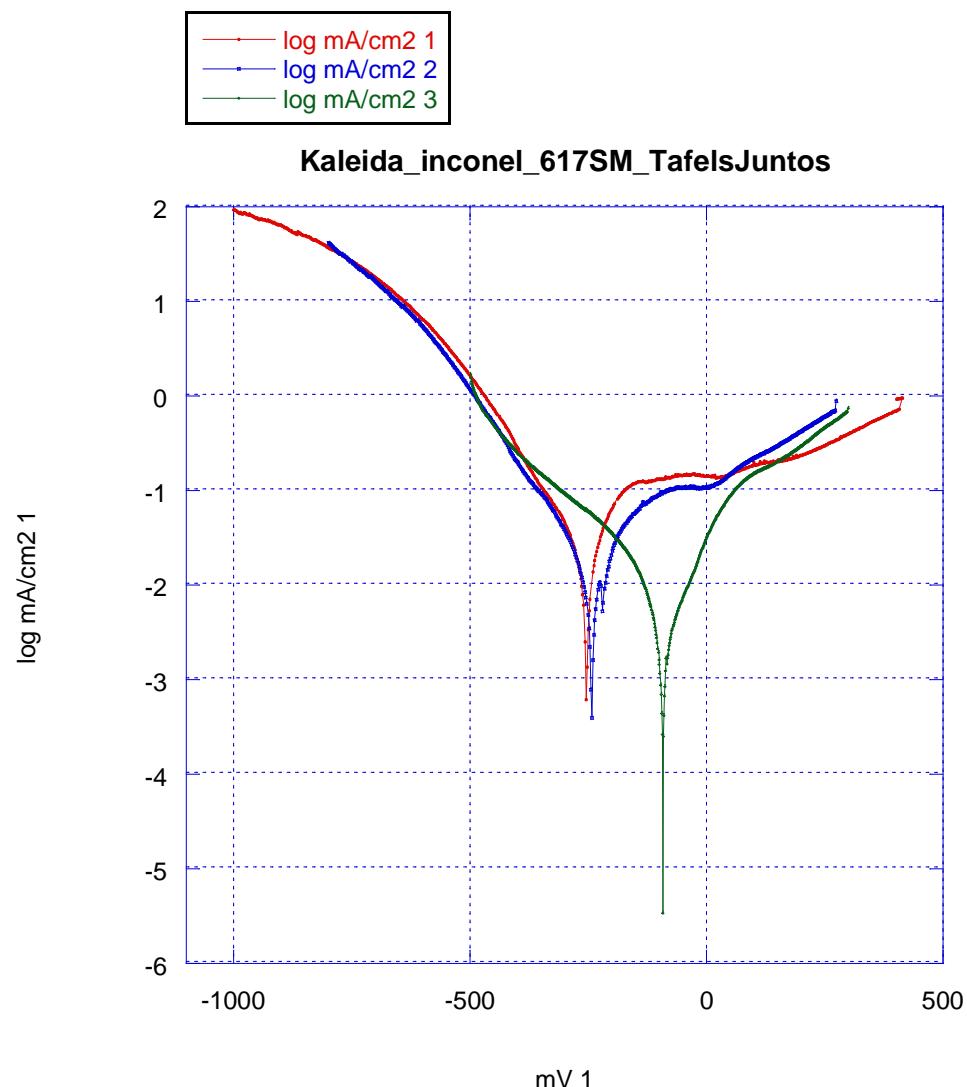


1.7.3. Inconel 617 SM Pitting corrosion HCl



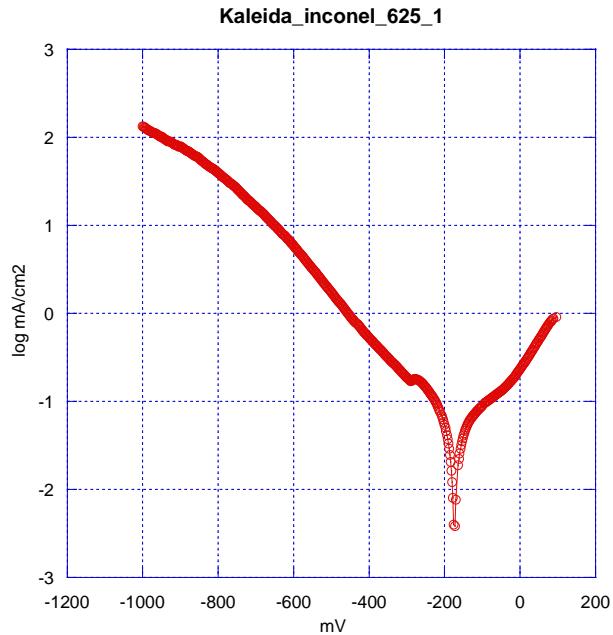




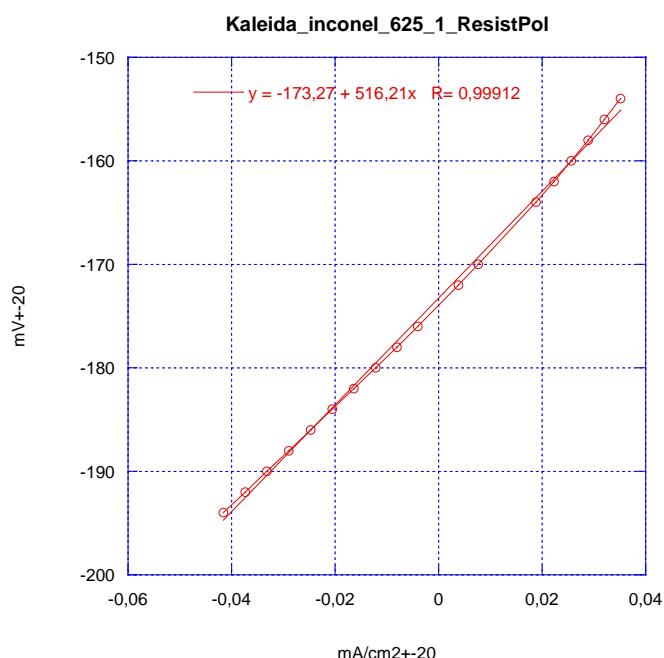


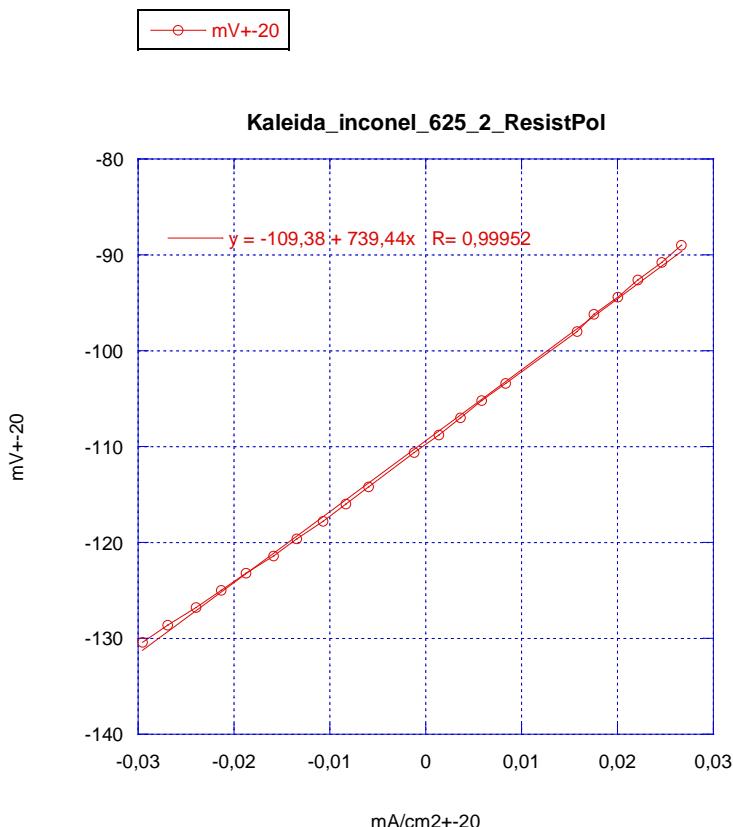
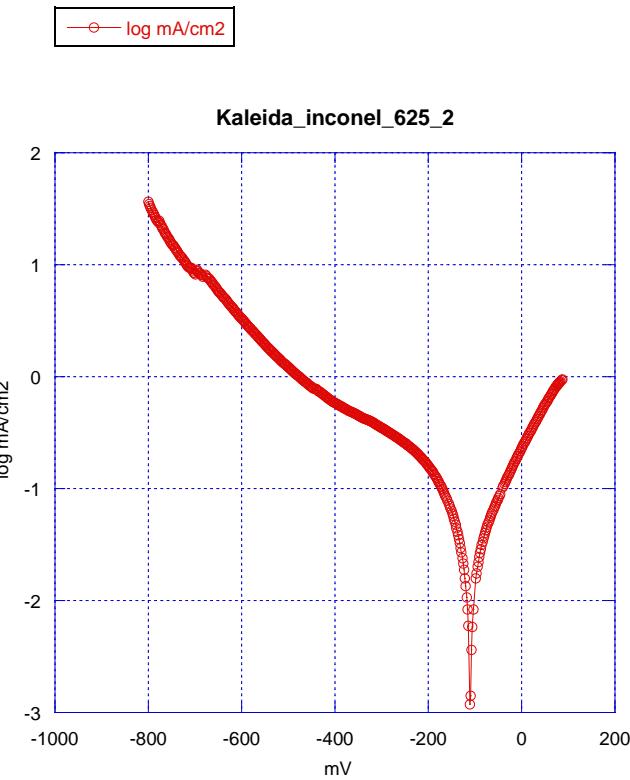
1.7.4. Inconel 625 Pitting corrosion HCl

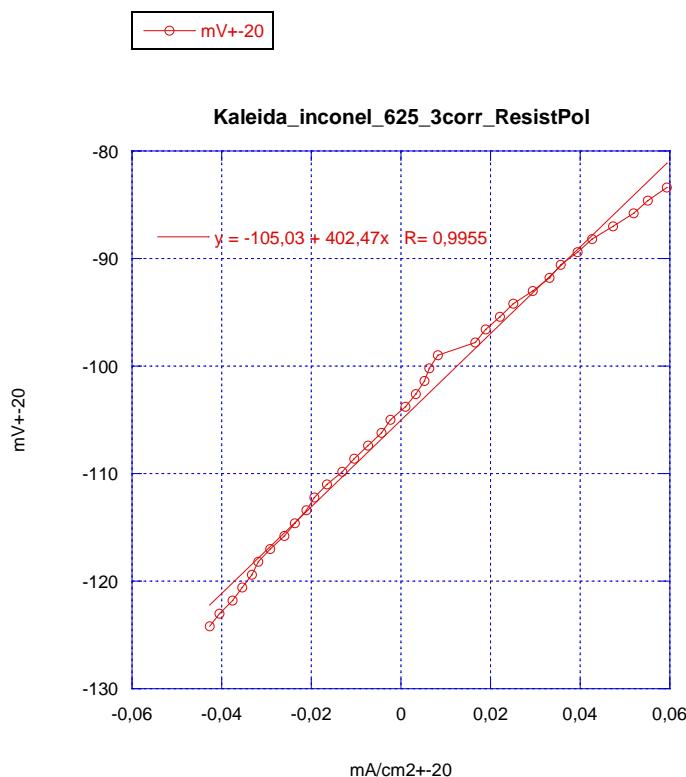
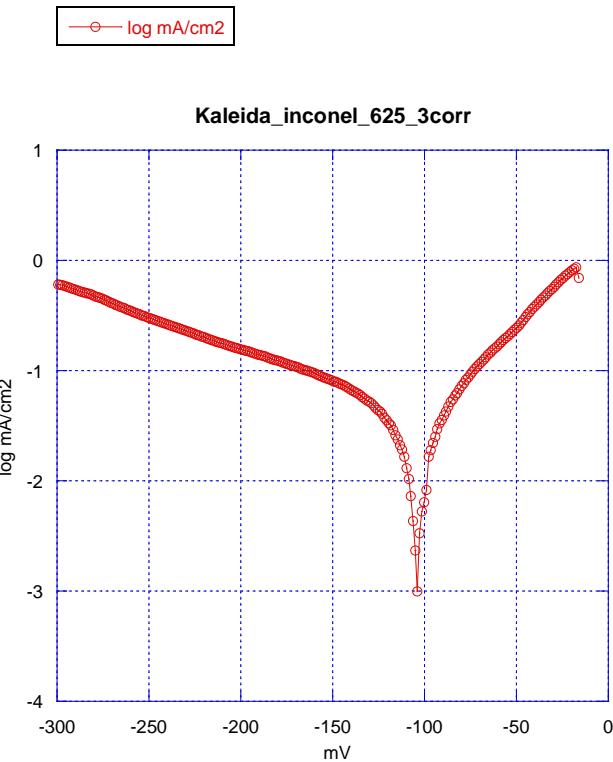
—○— log mA/cm²

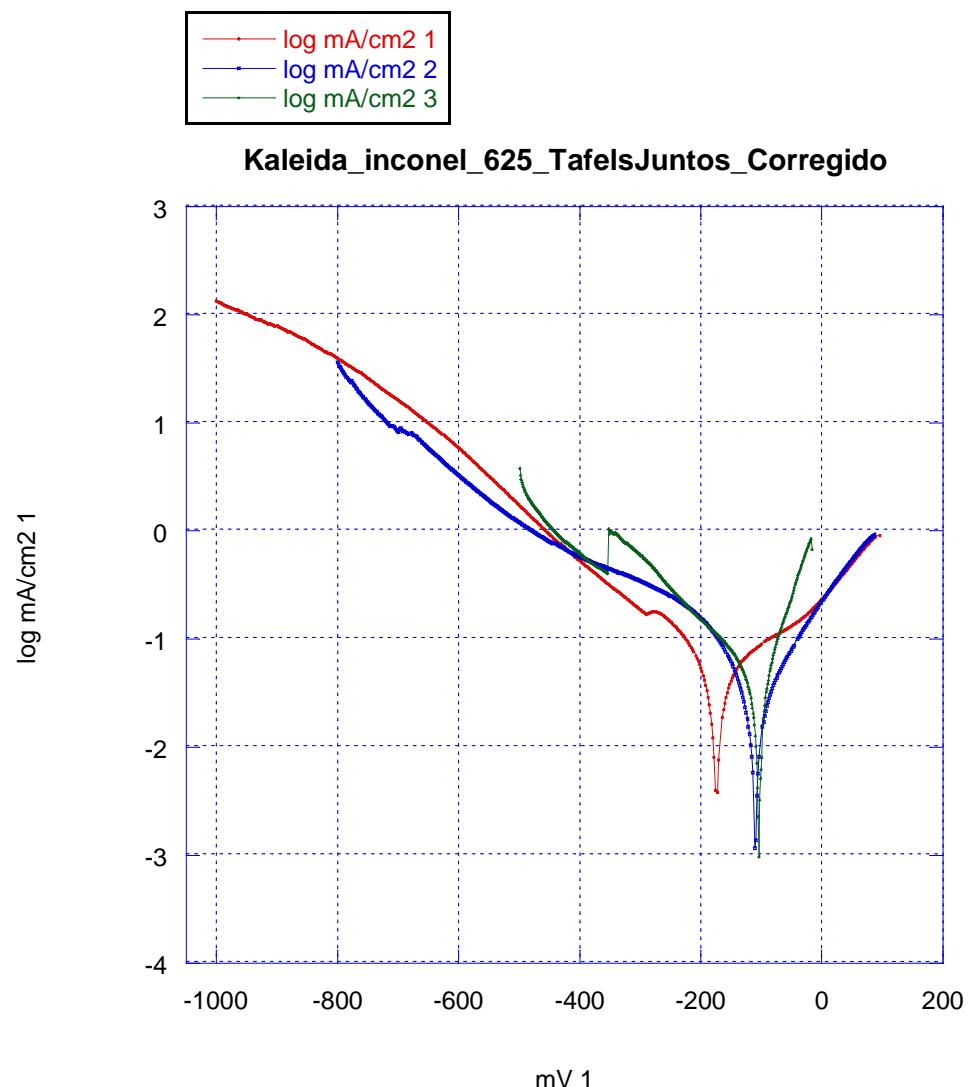


—○— mV+20

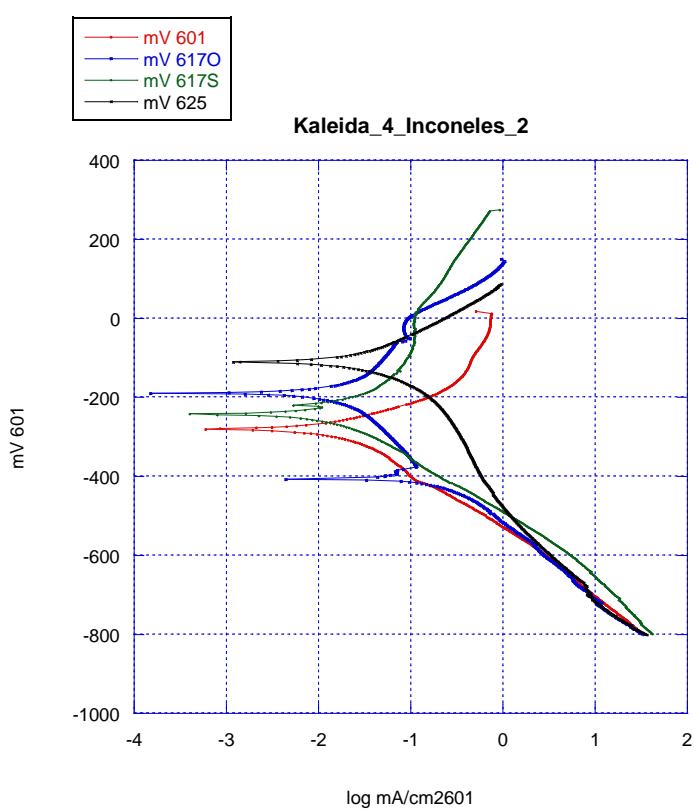
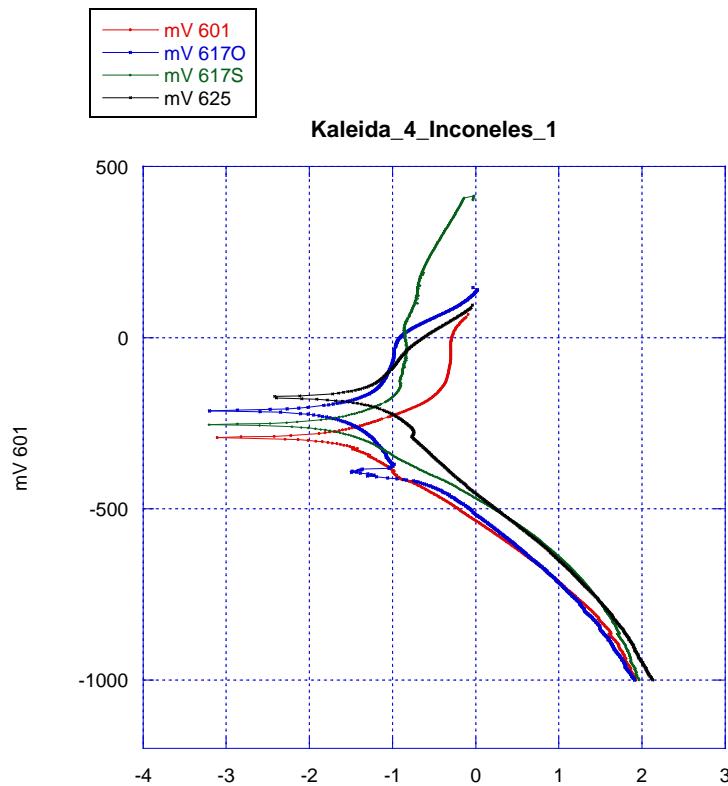


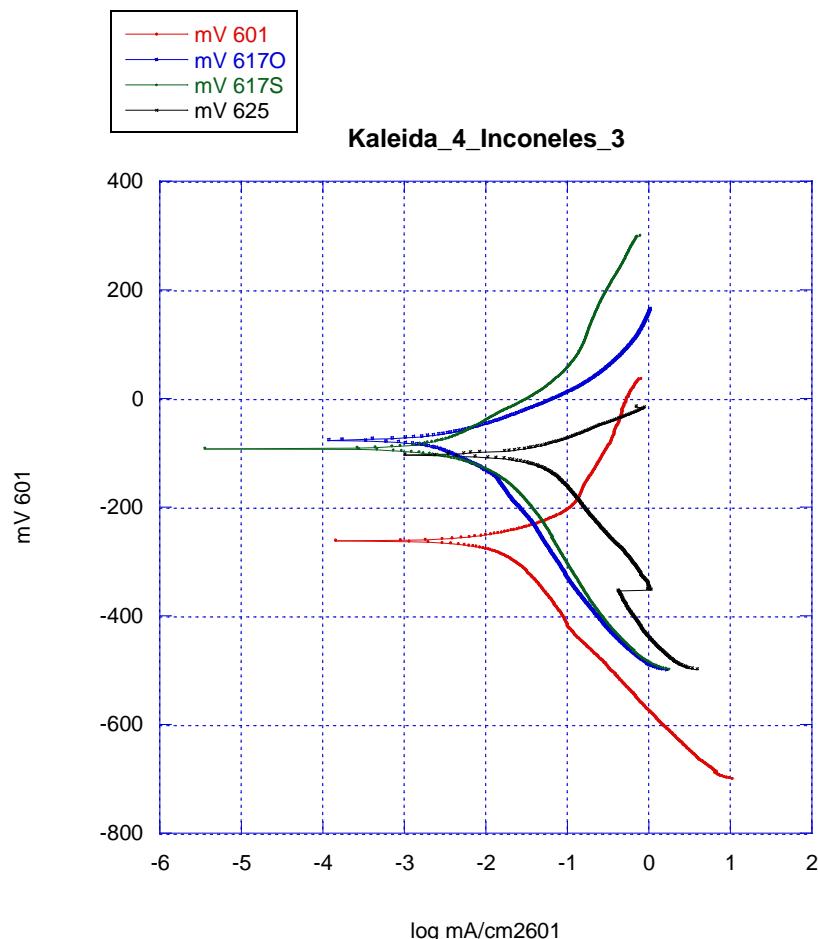




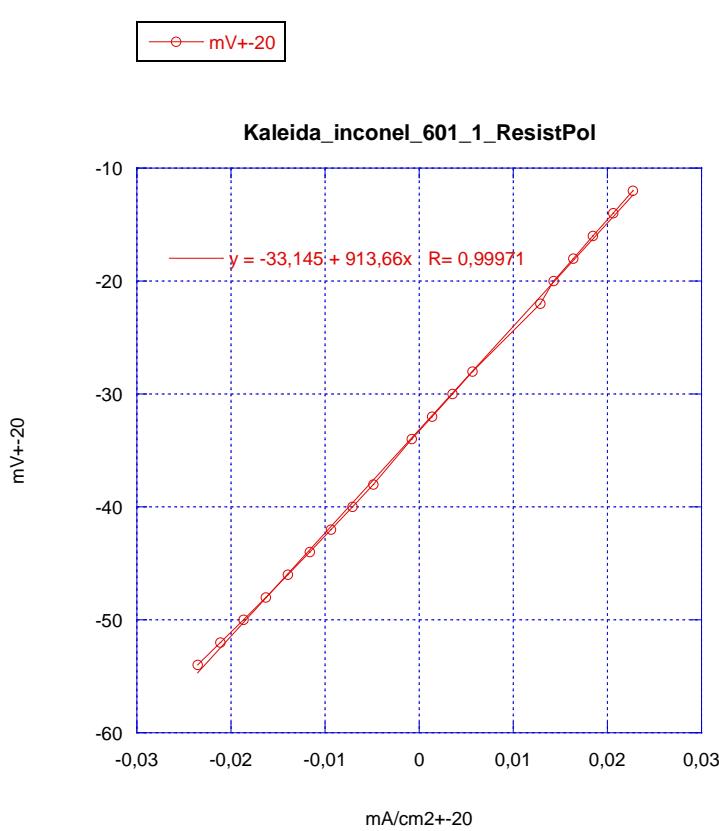
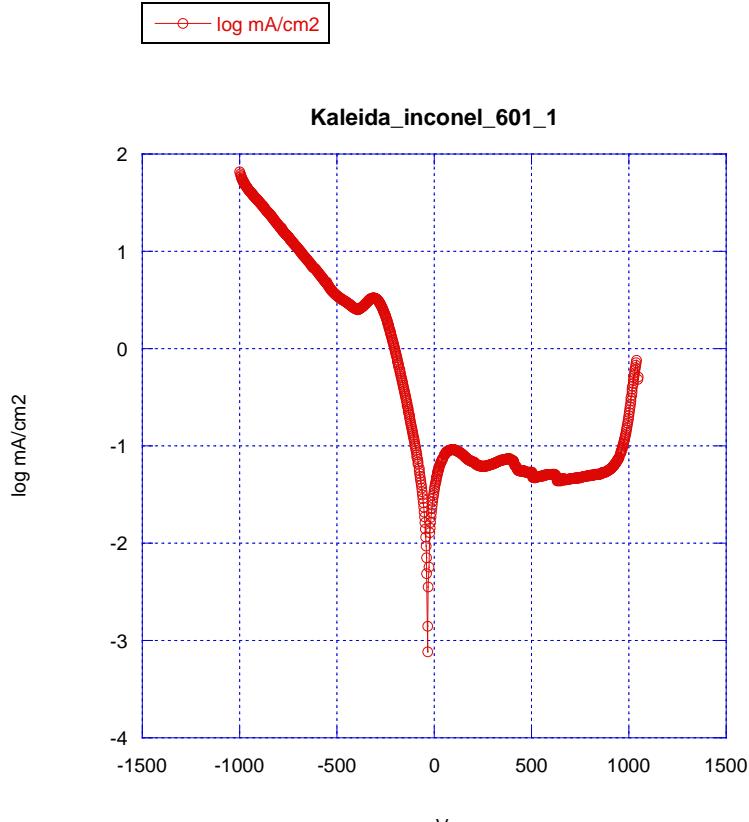


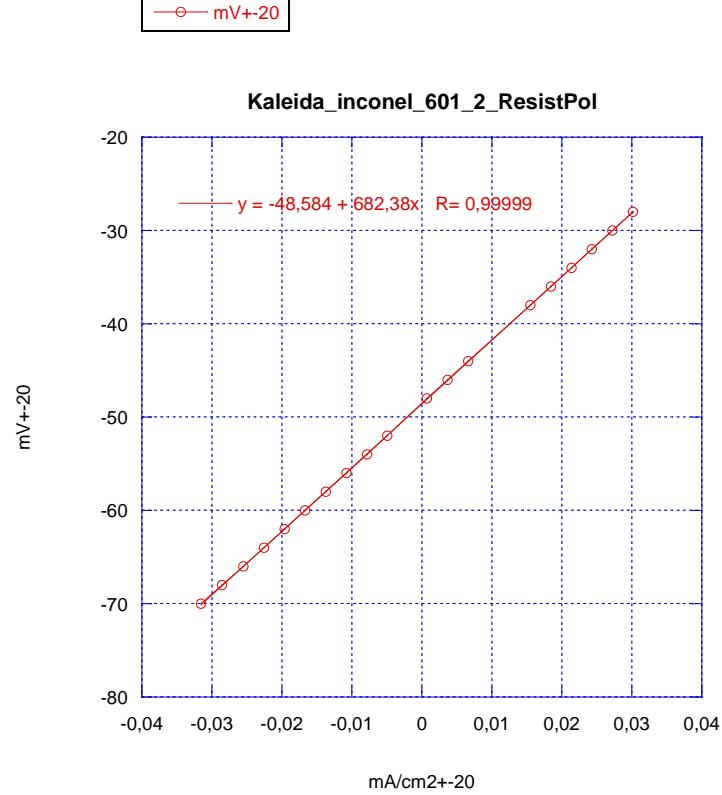
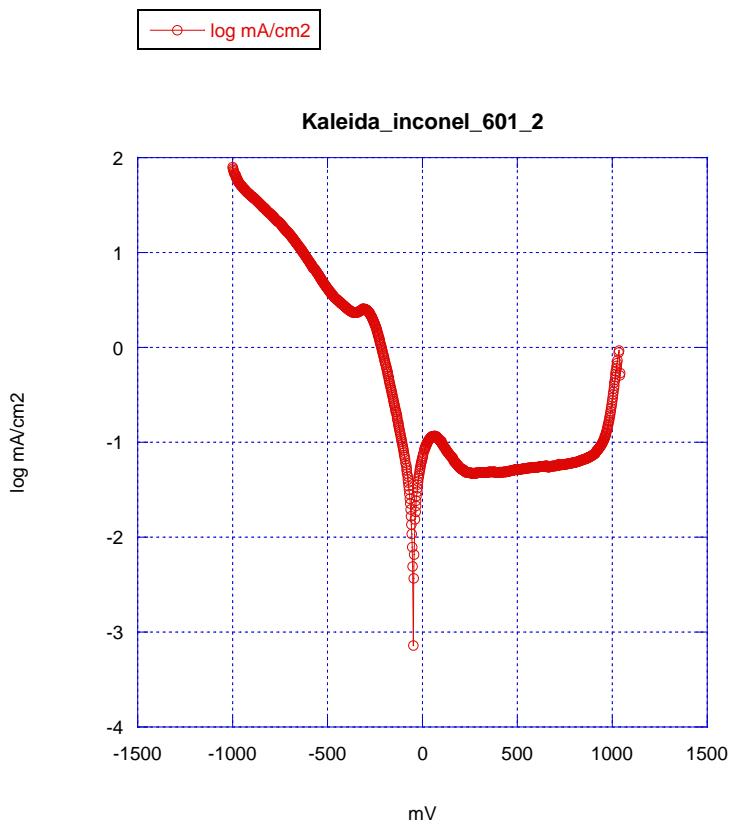
1.7.5. Comparación Inconeles Pitting corrosion HCl

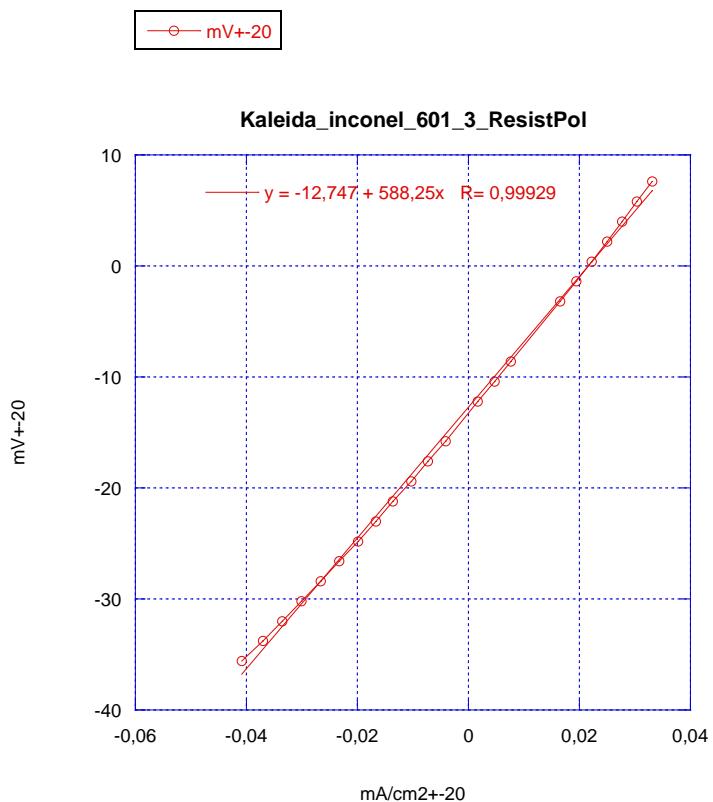
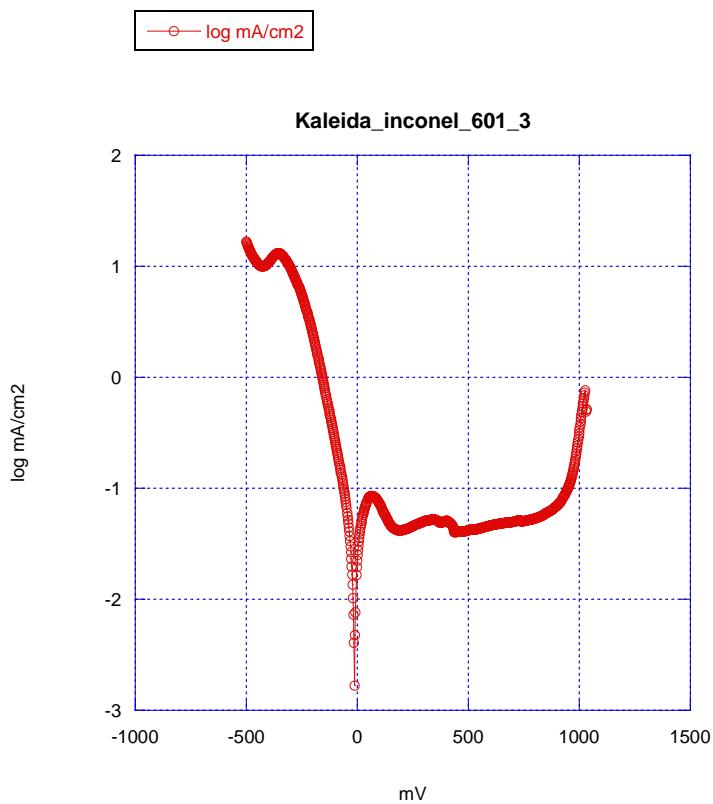


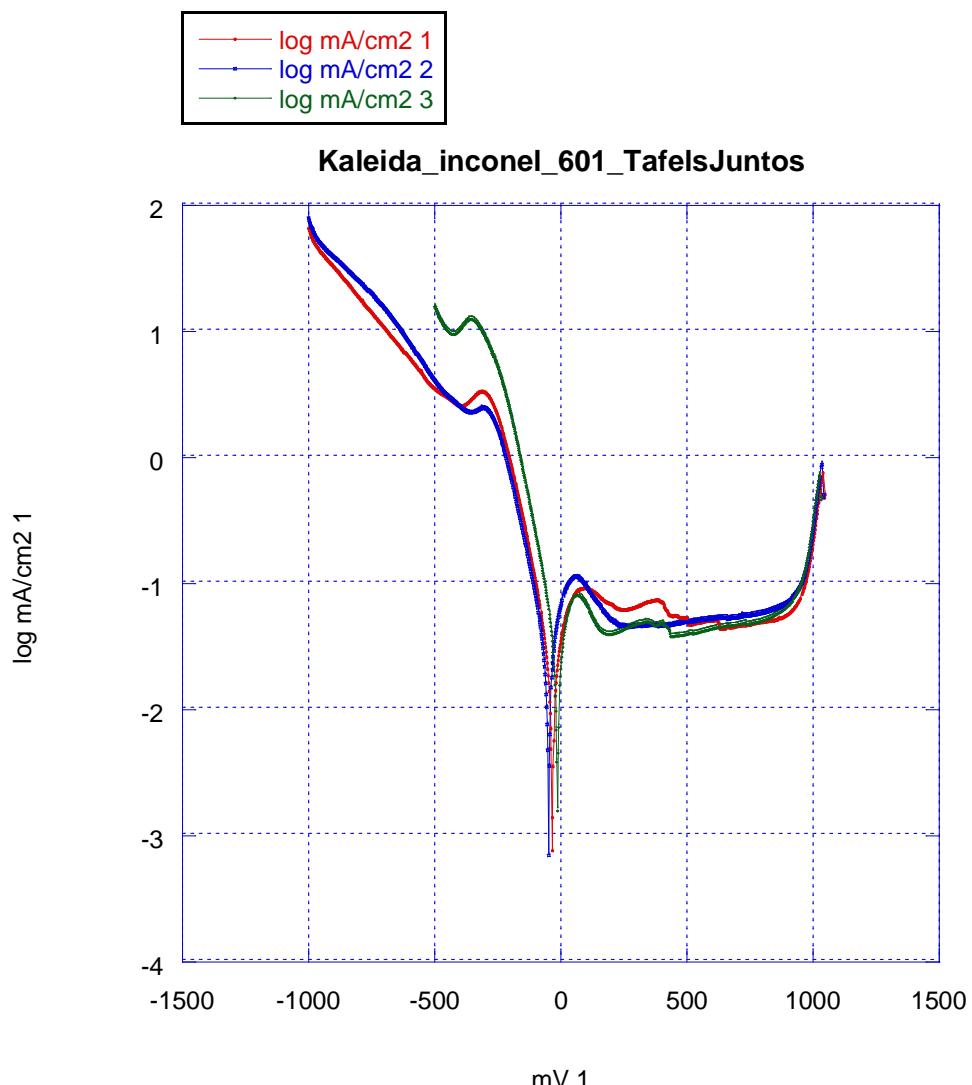


1.7.6. Inconel 601 Pitting corrosion HNO₃

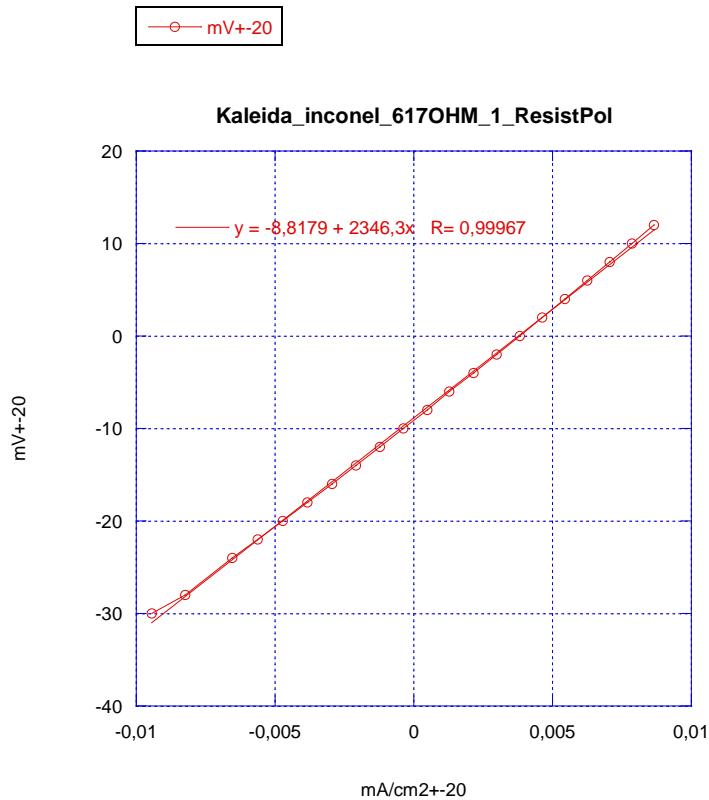
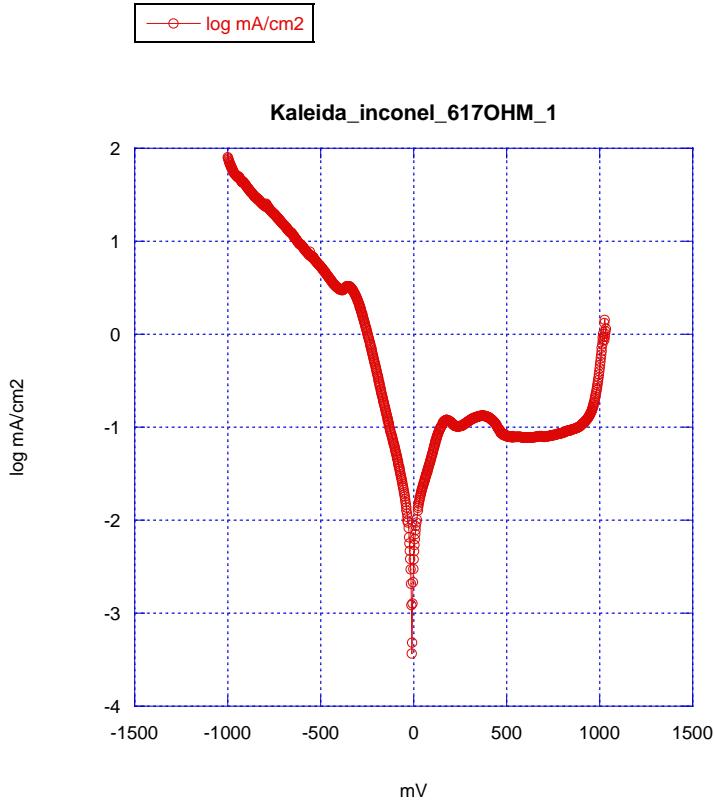


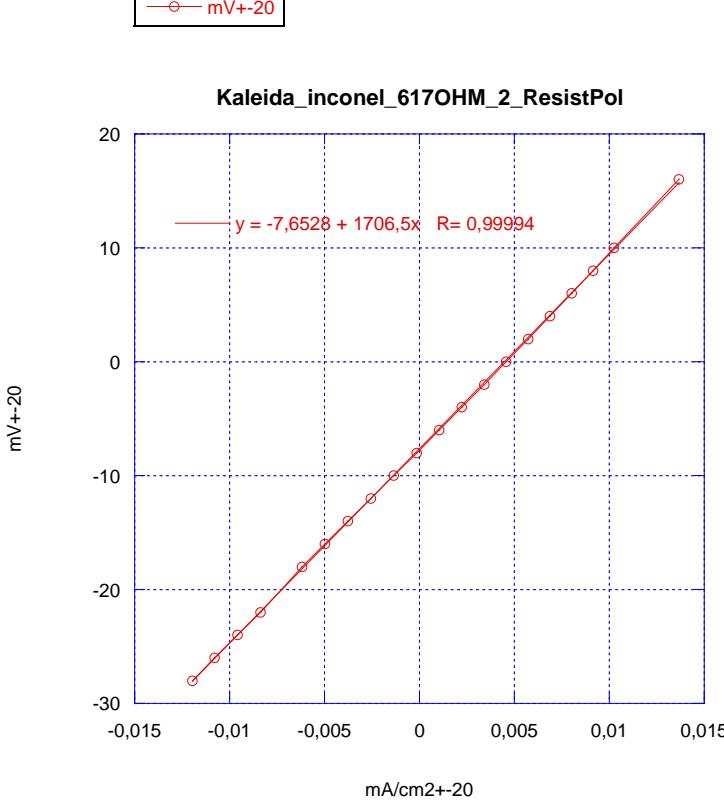
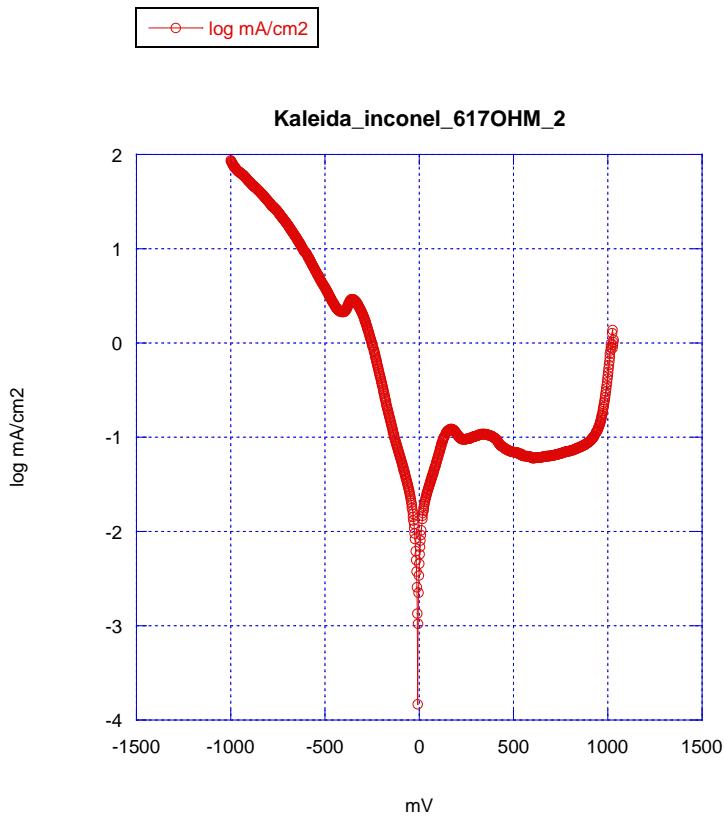


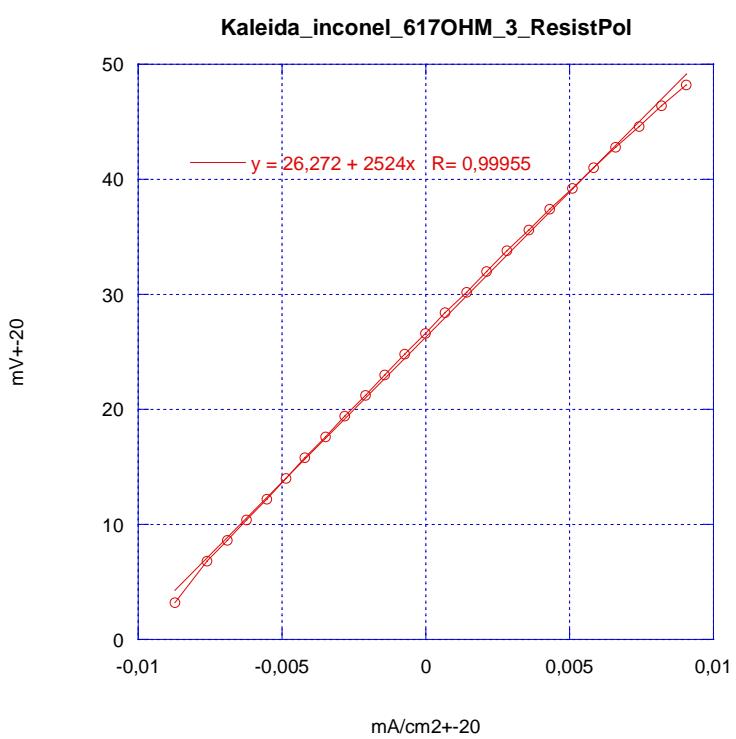
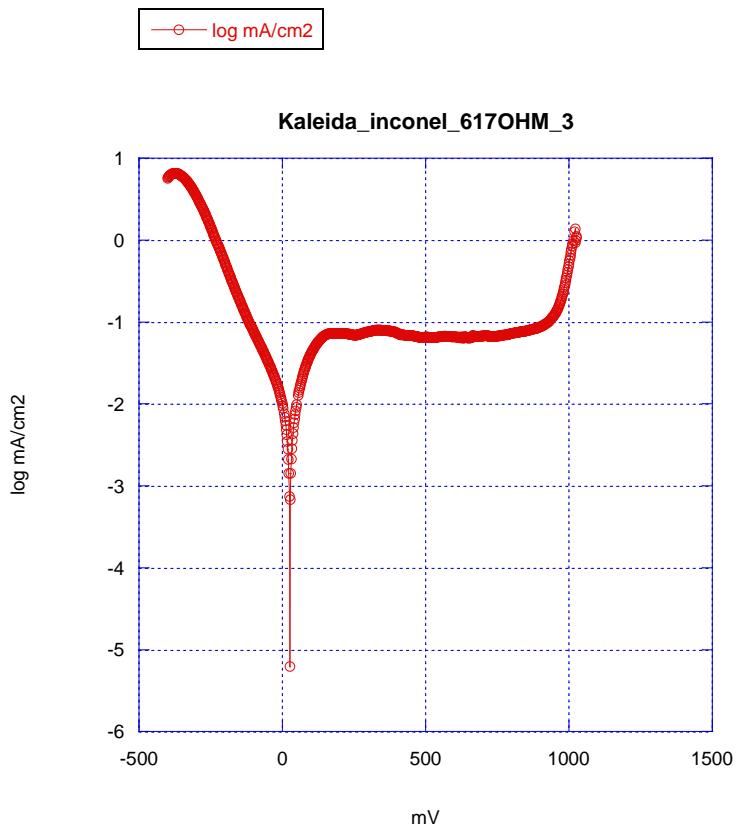


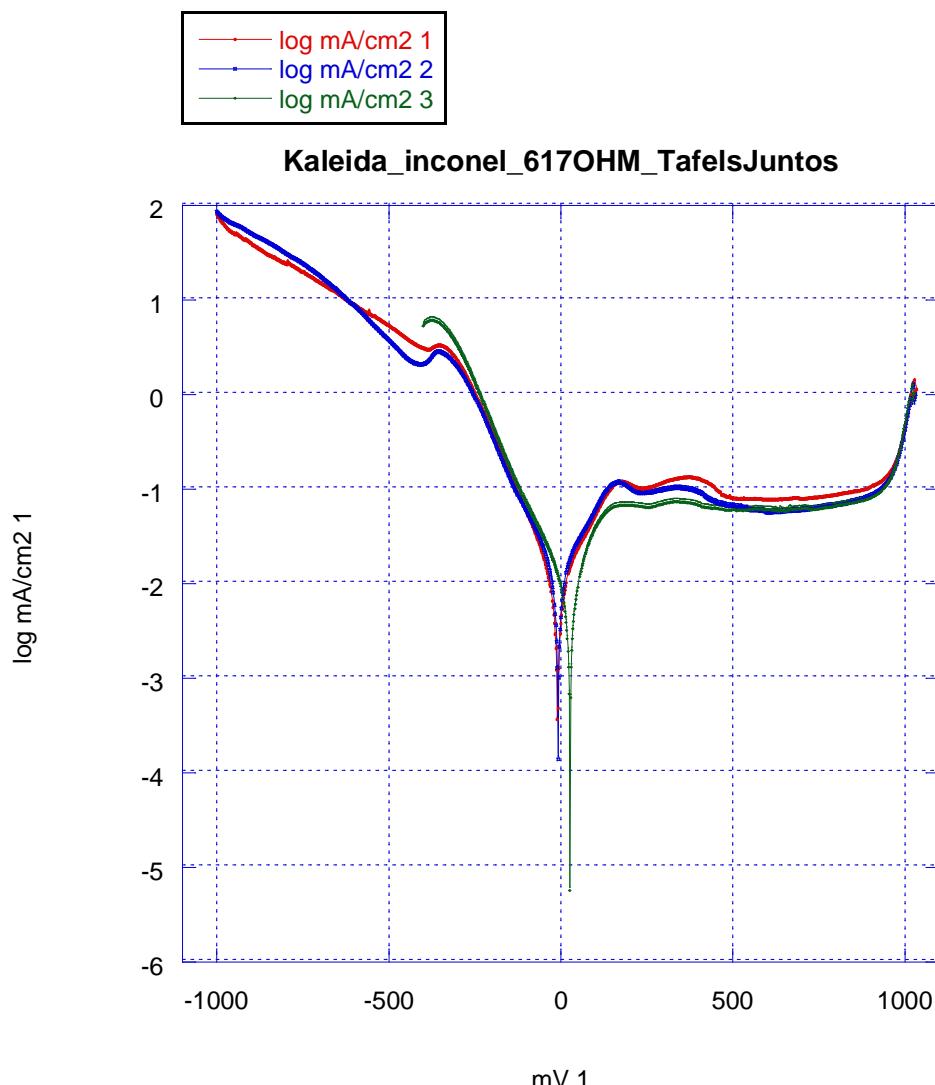


1.7.7. Inconel 617 OHM Pitting corrosion HNO₃

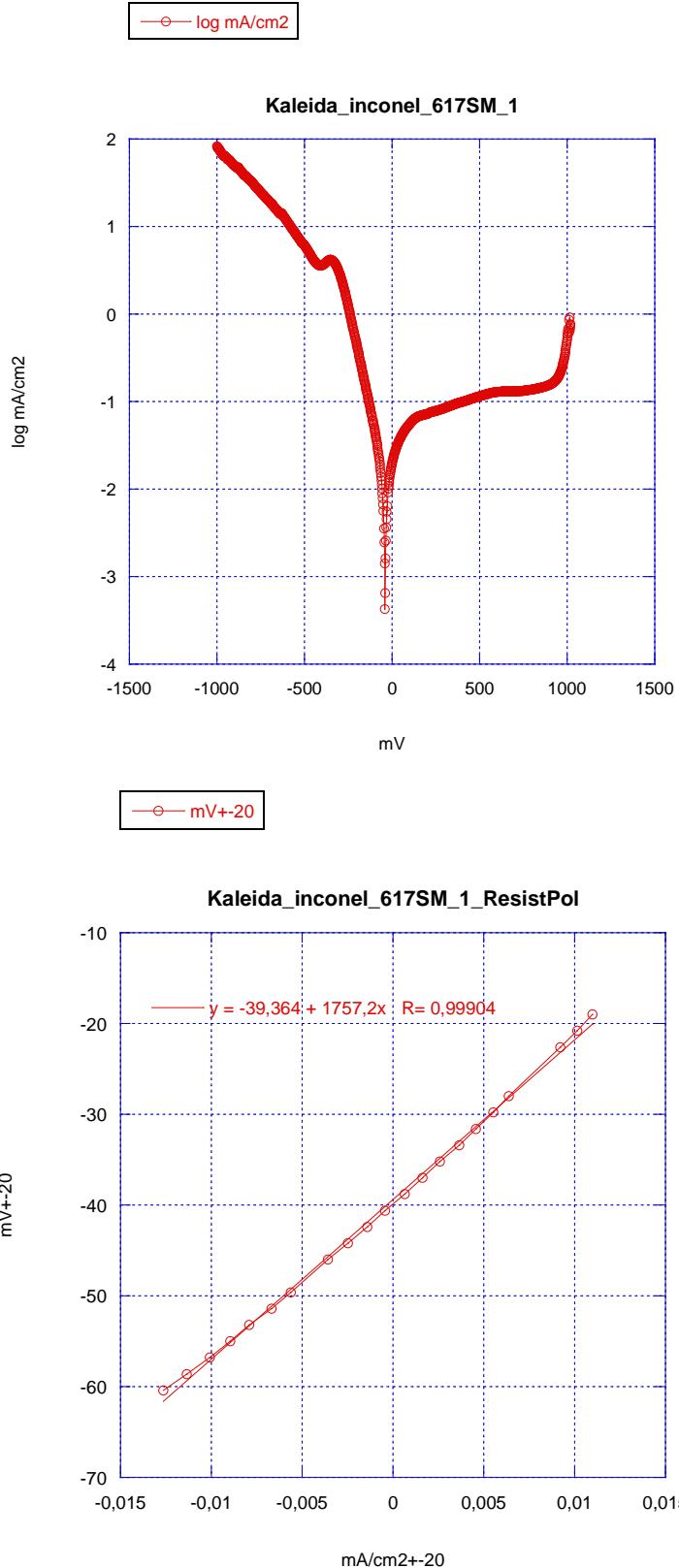


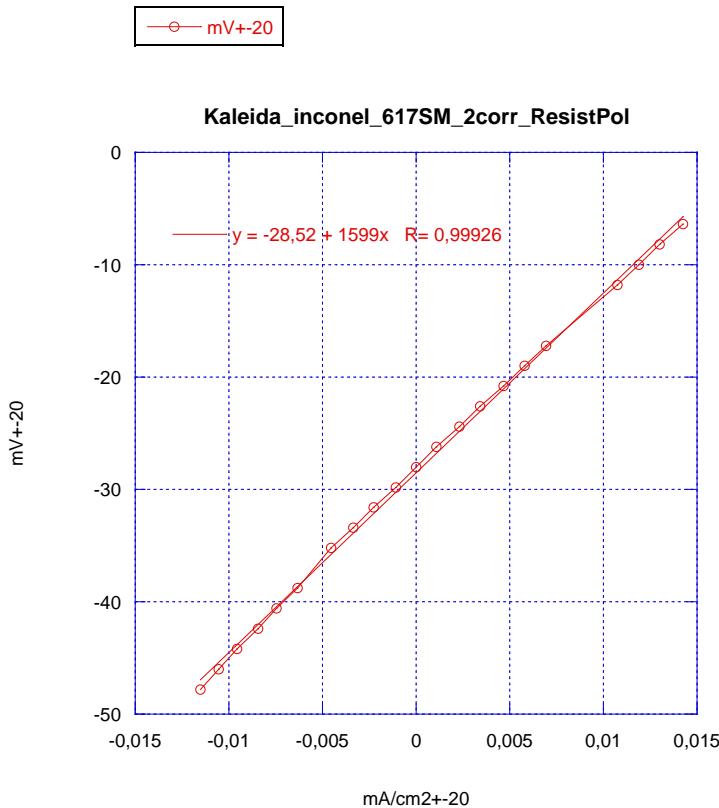
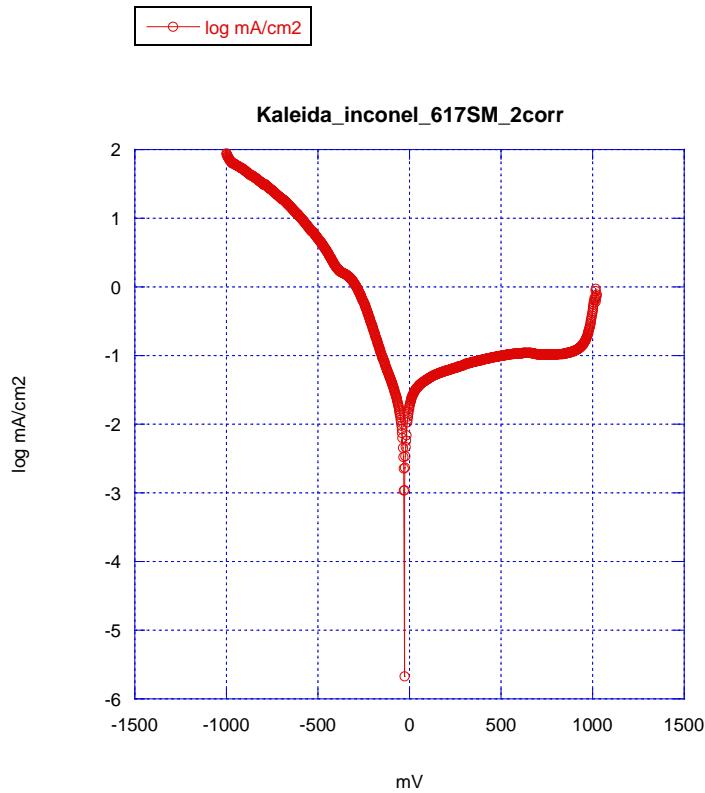


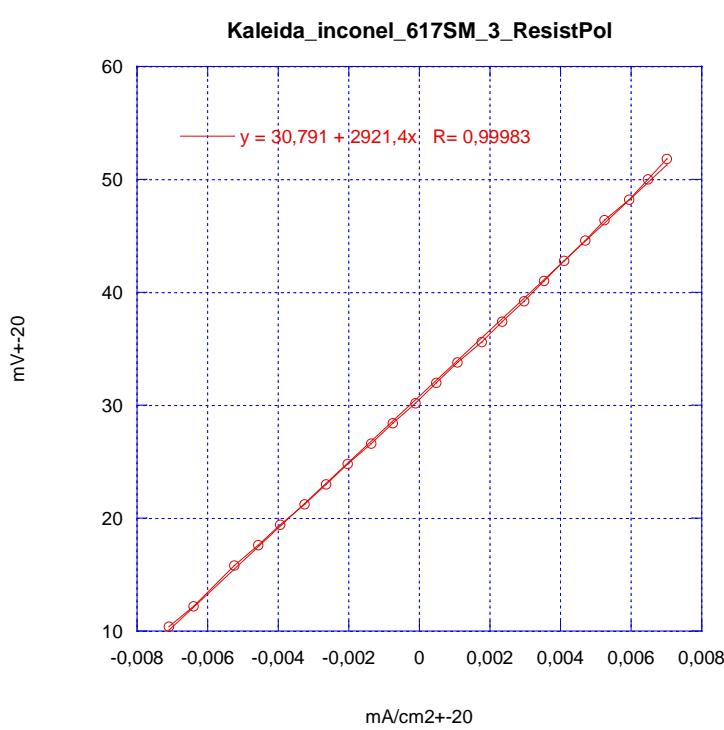
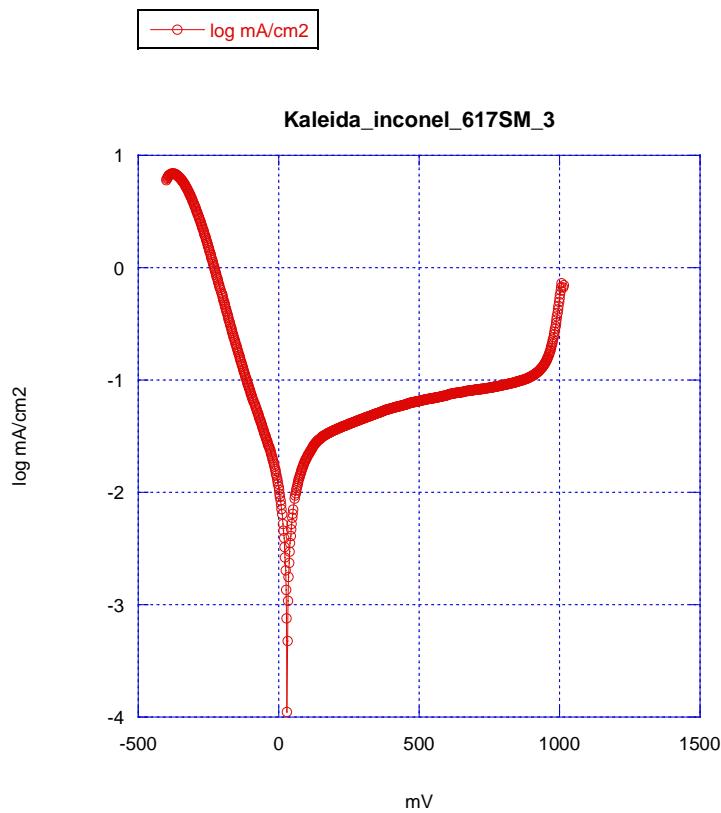


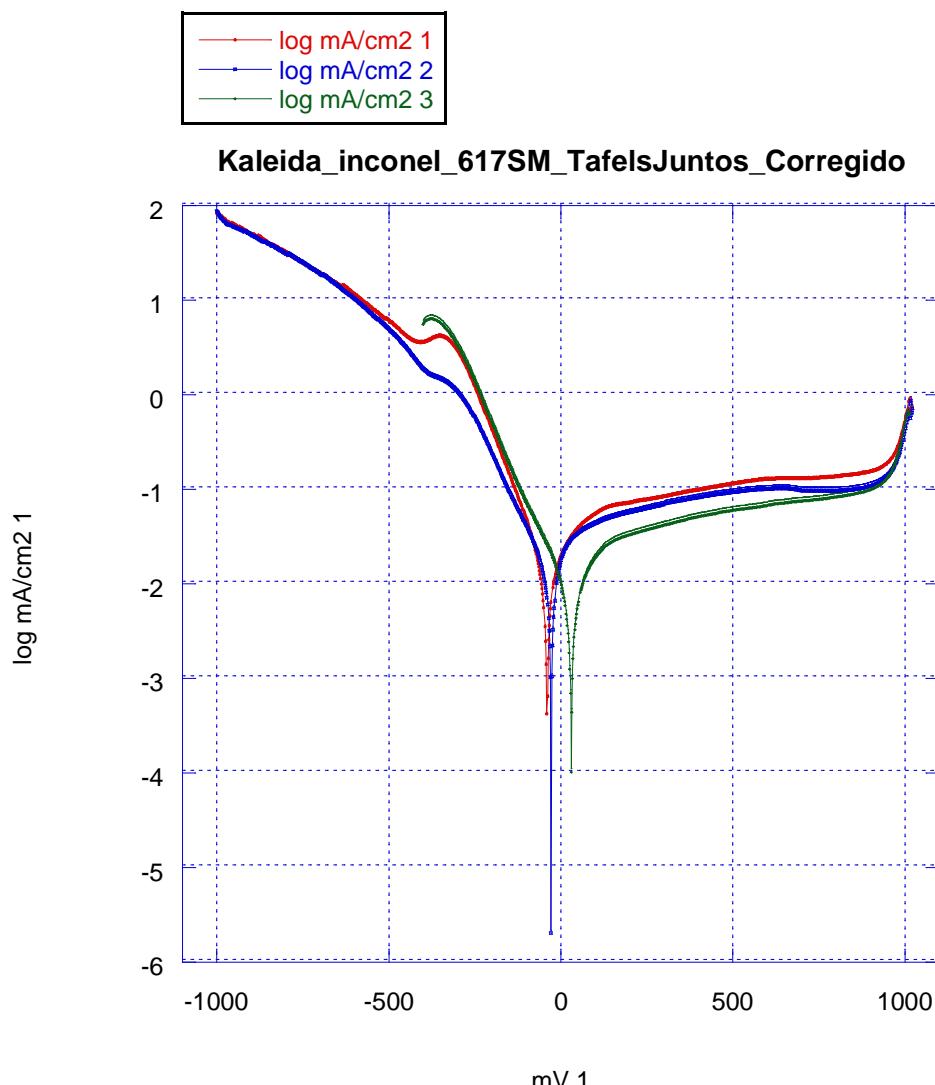


1.7.8. Inconel 617 SM Pitting corrosion HNO₃

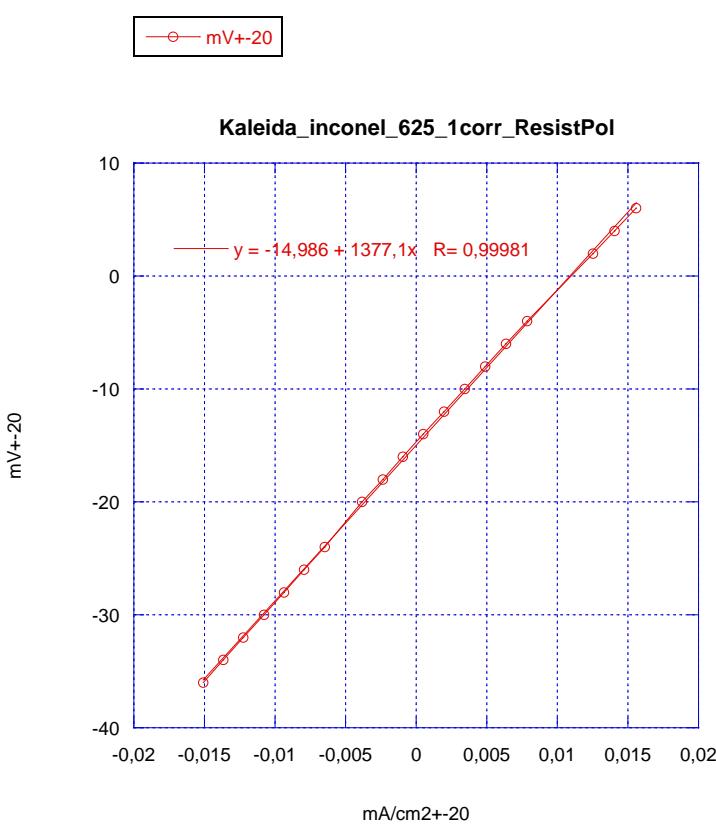
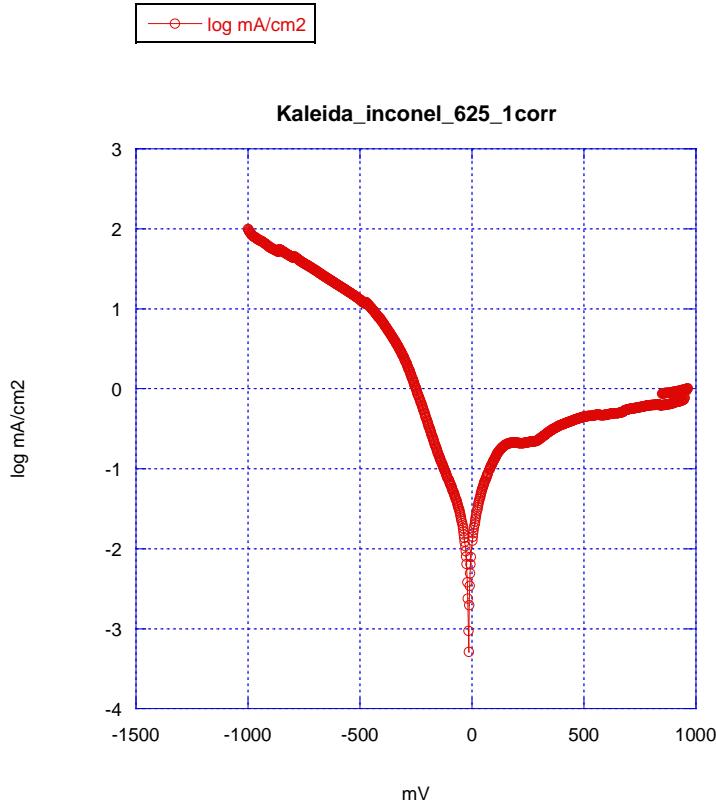


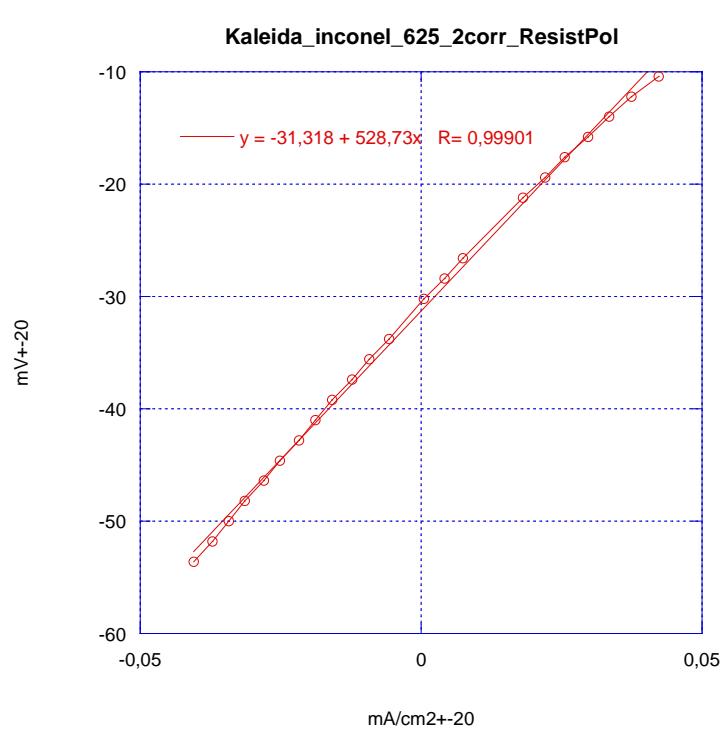
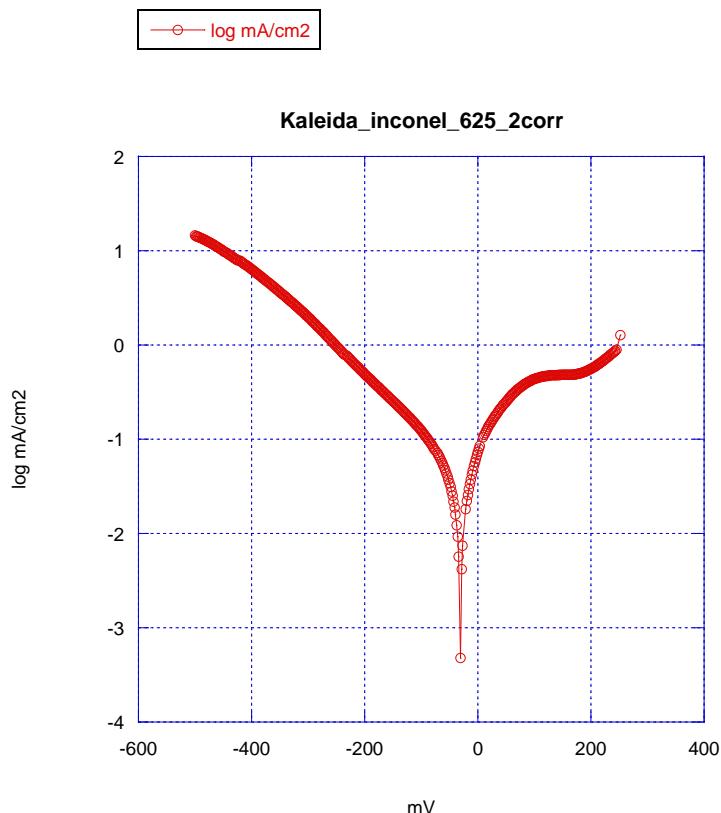


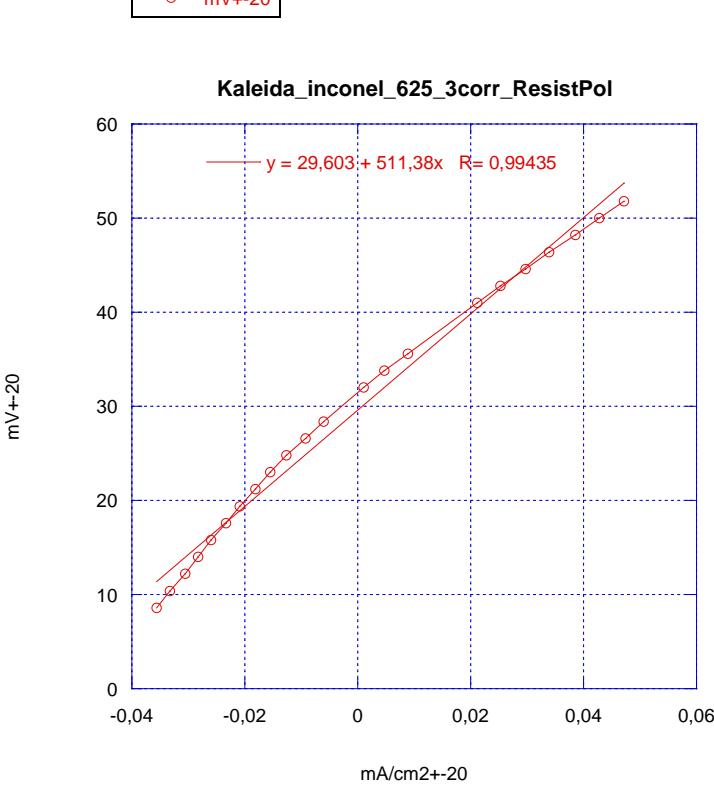
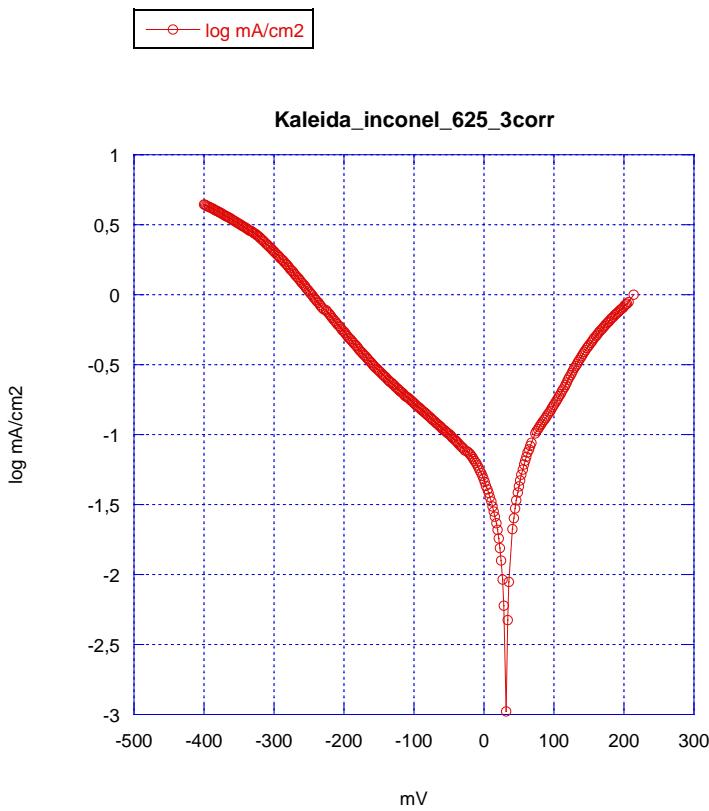


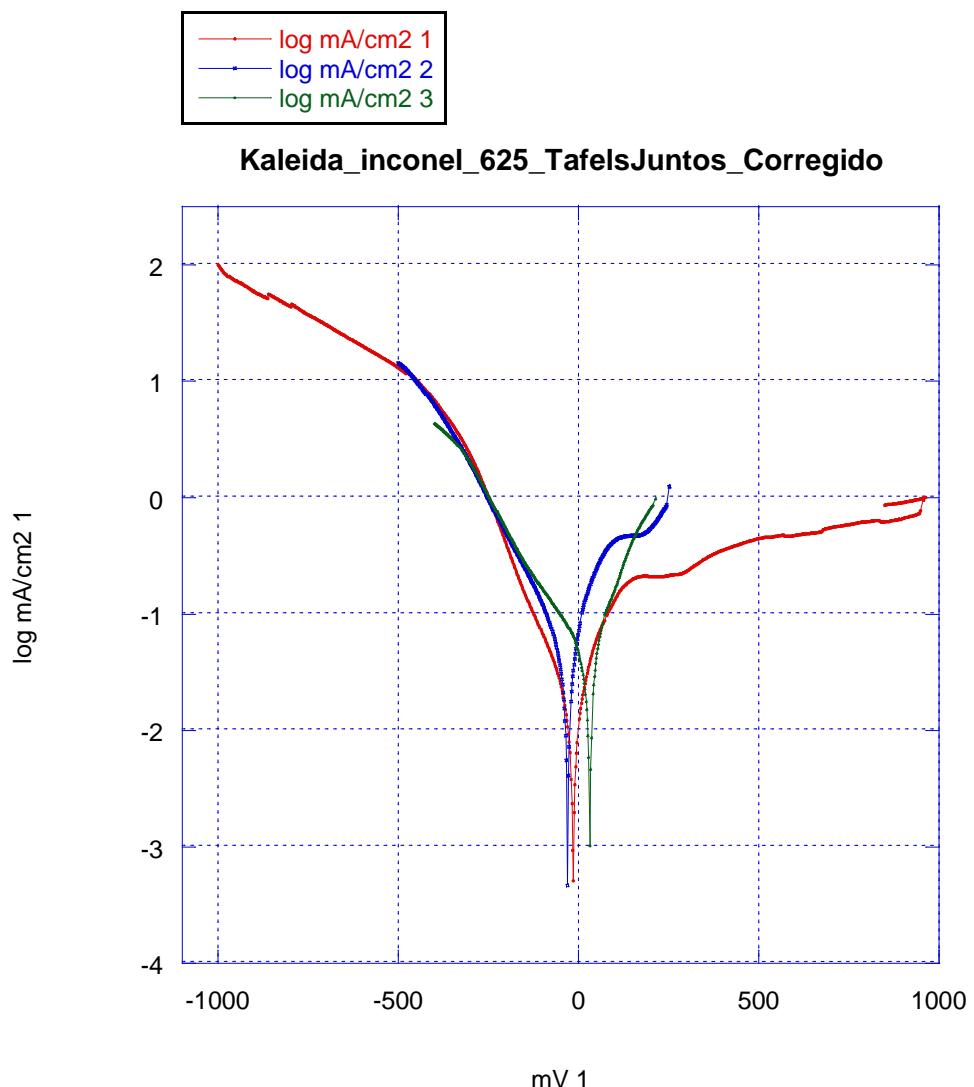


1.7.9. Inconel 625 Pitting corrosion HNO₃

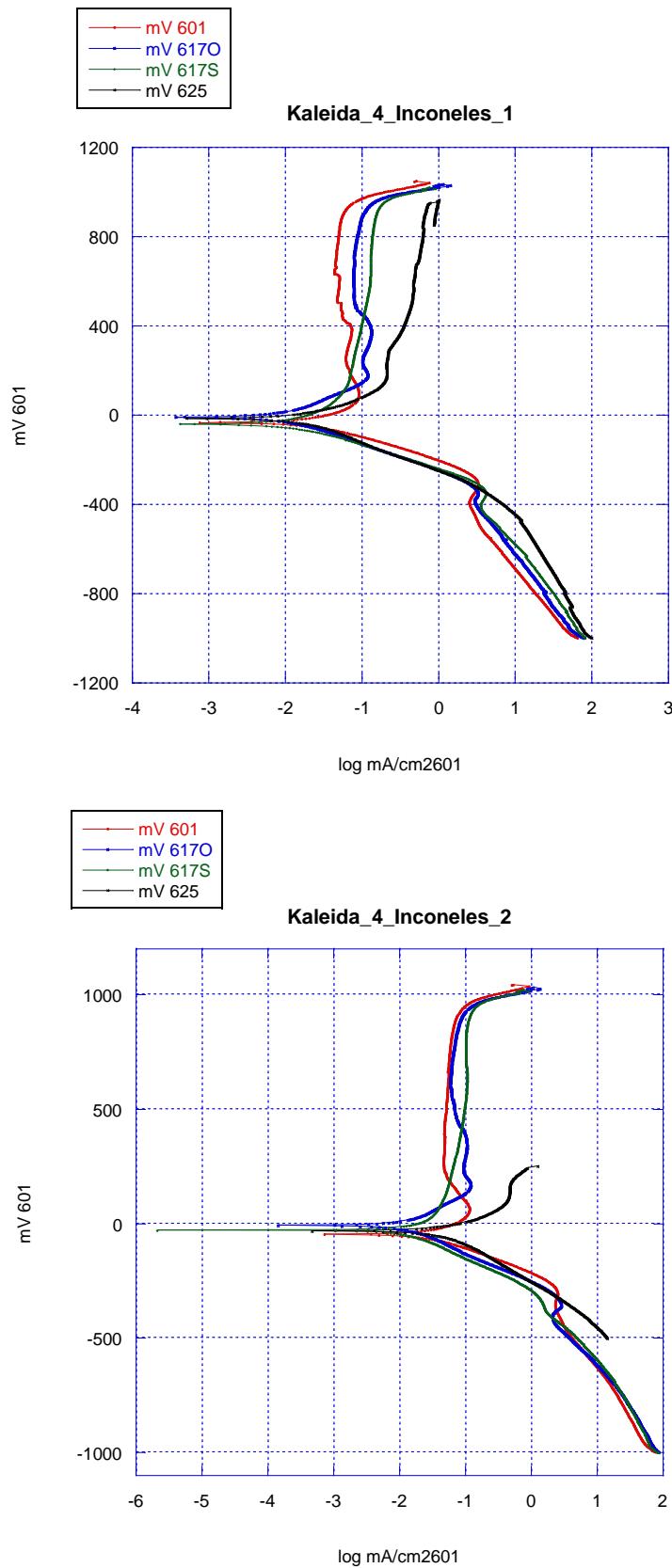


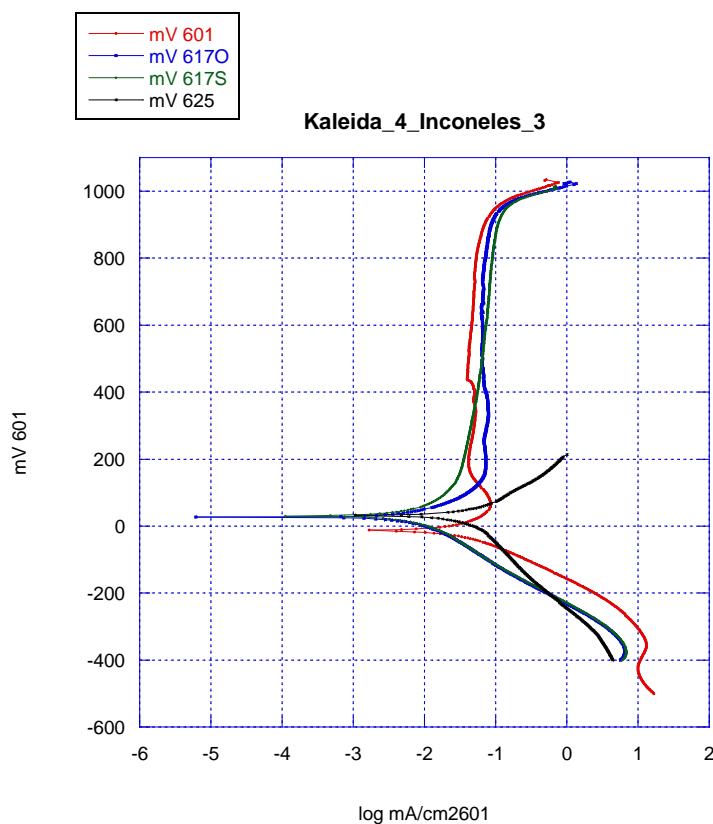




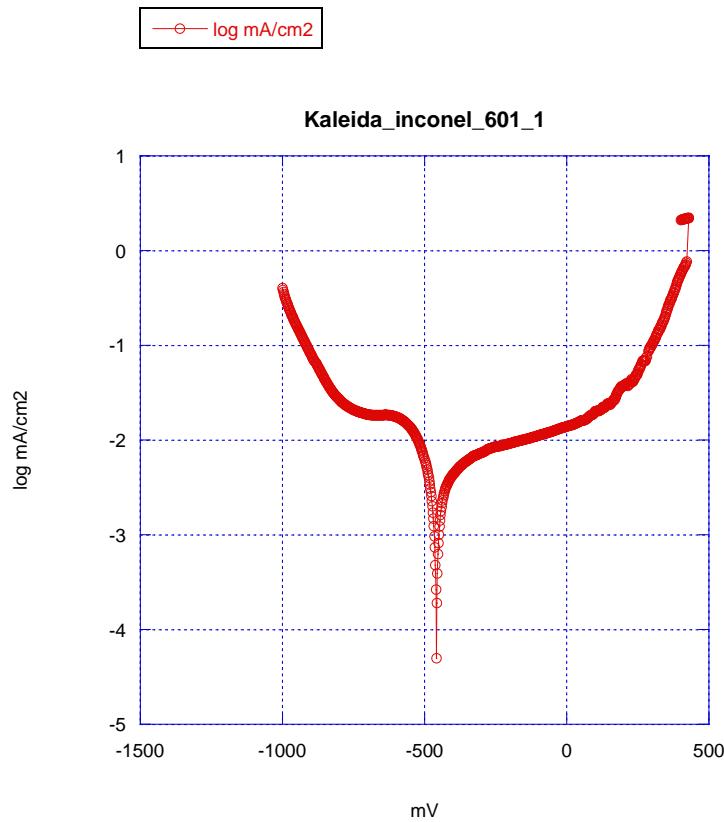


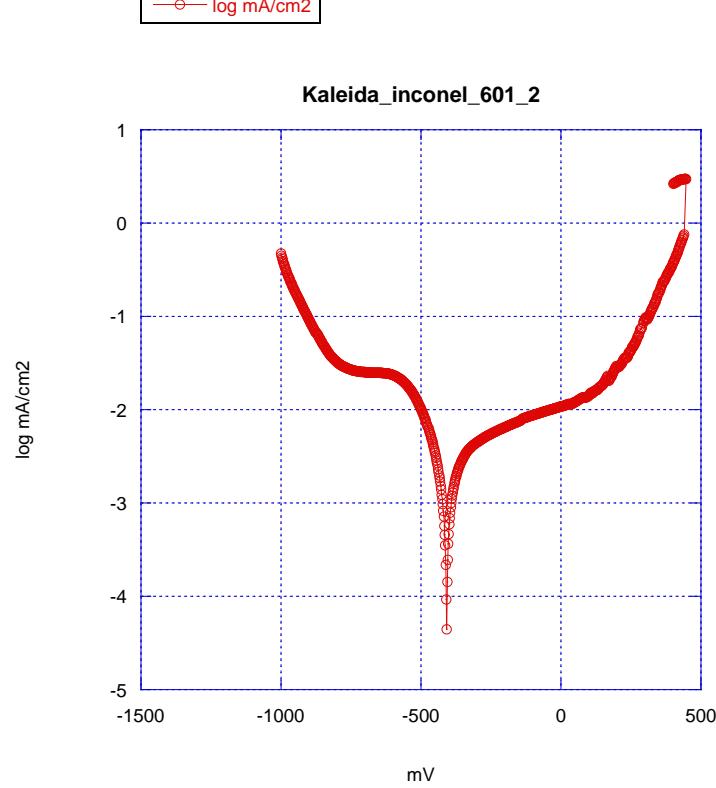
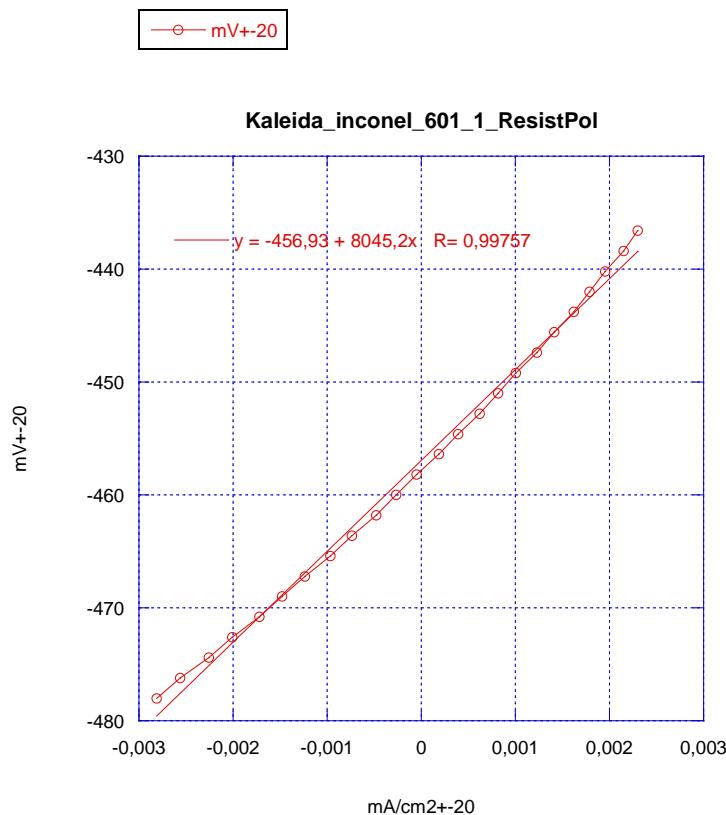
1.7.10. Comparación Inconel Pitting corrosion HNO₃

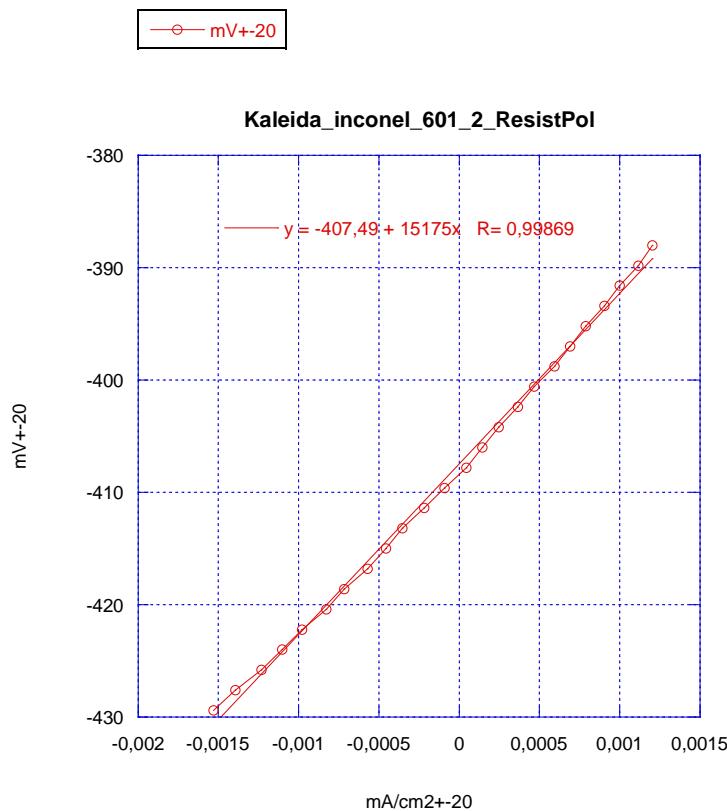


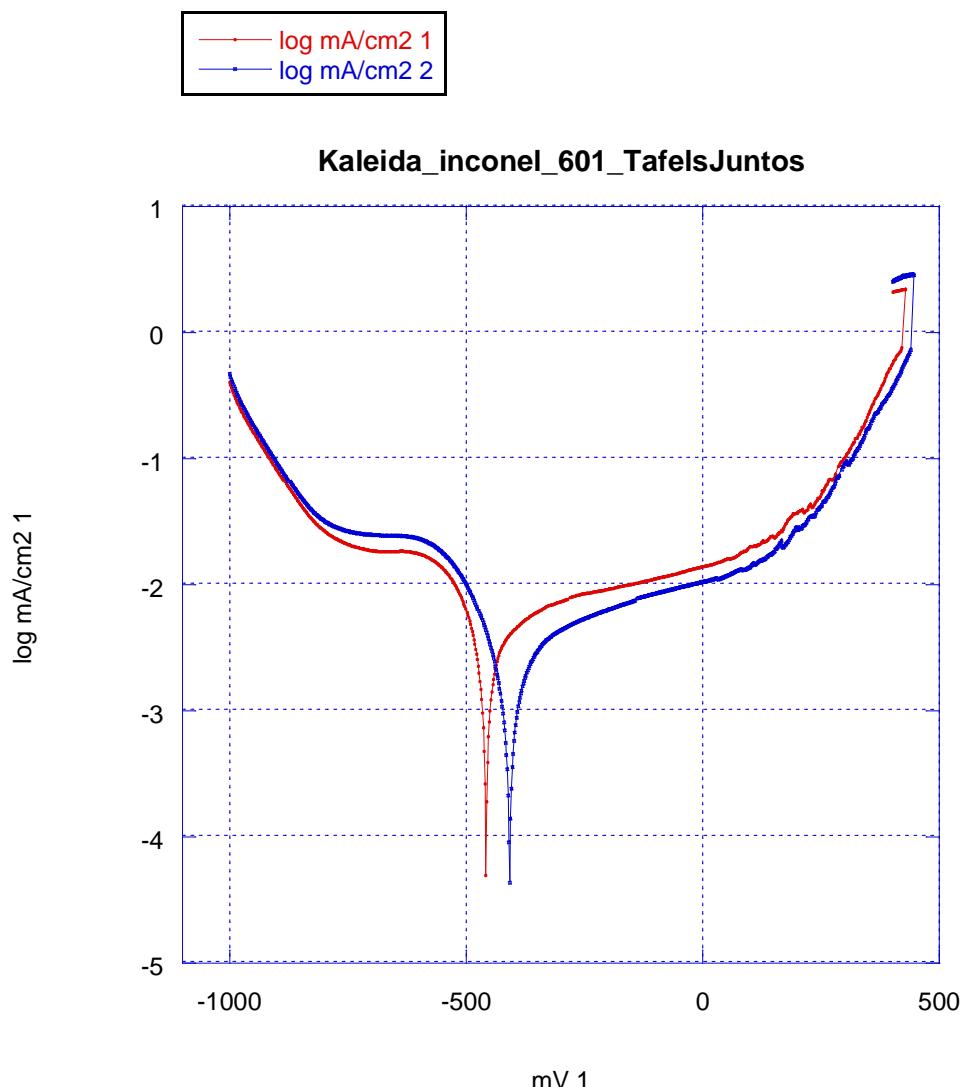


1.7.11. Inconel 601 Pitting corrosion NaCl

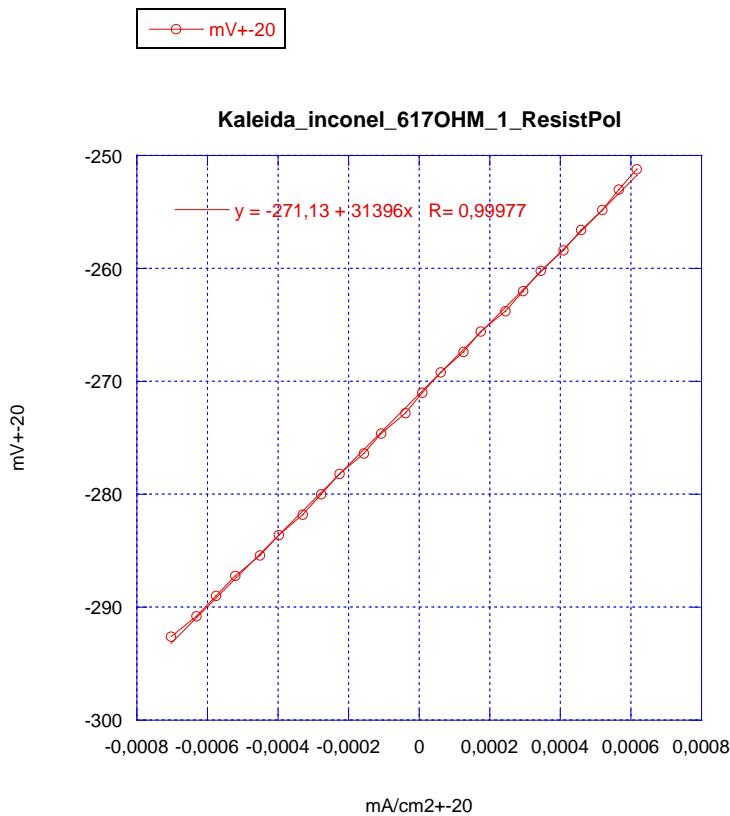
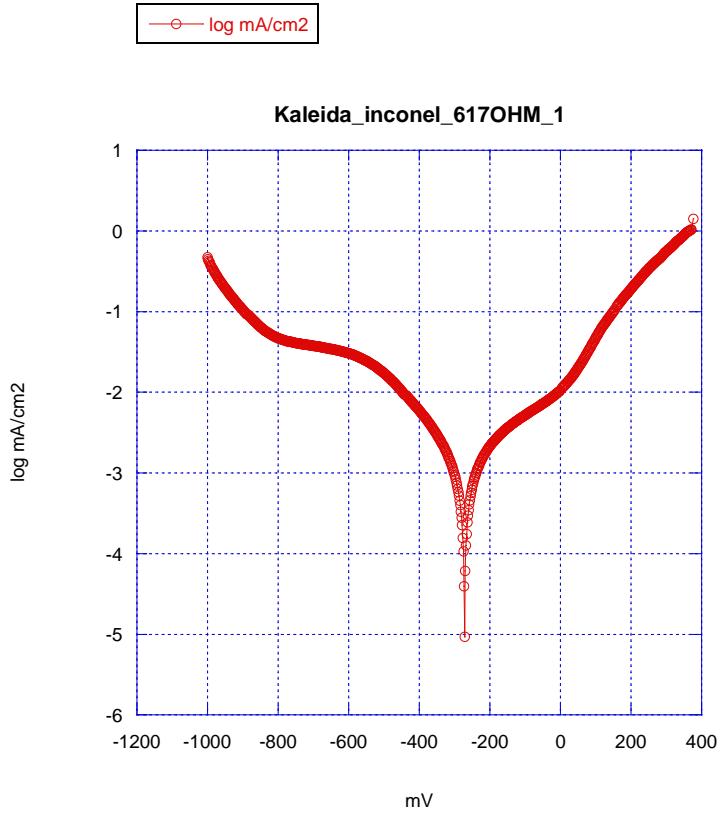


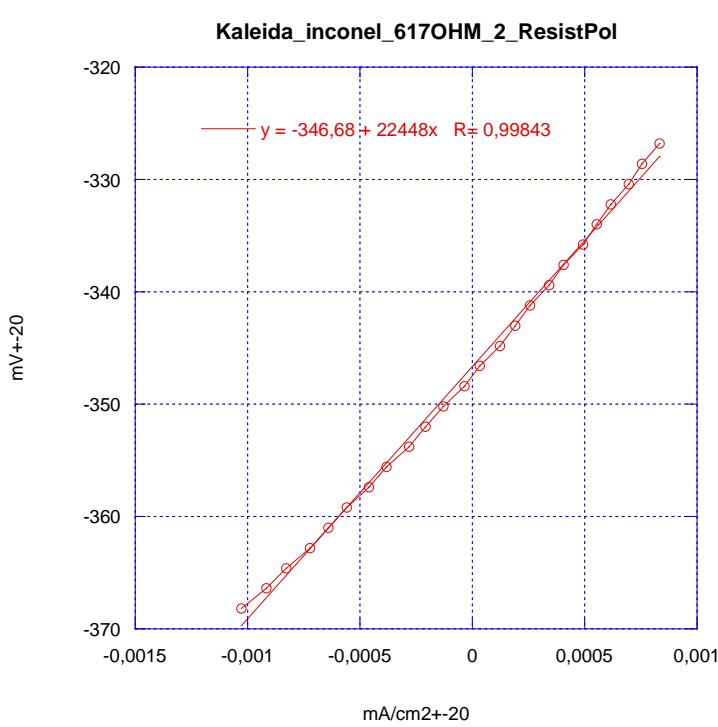
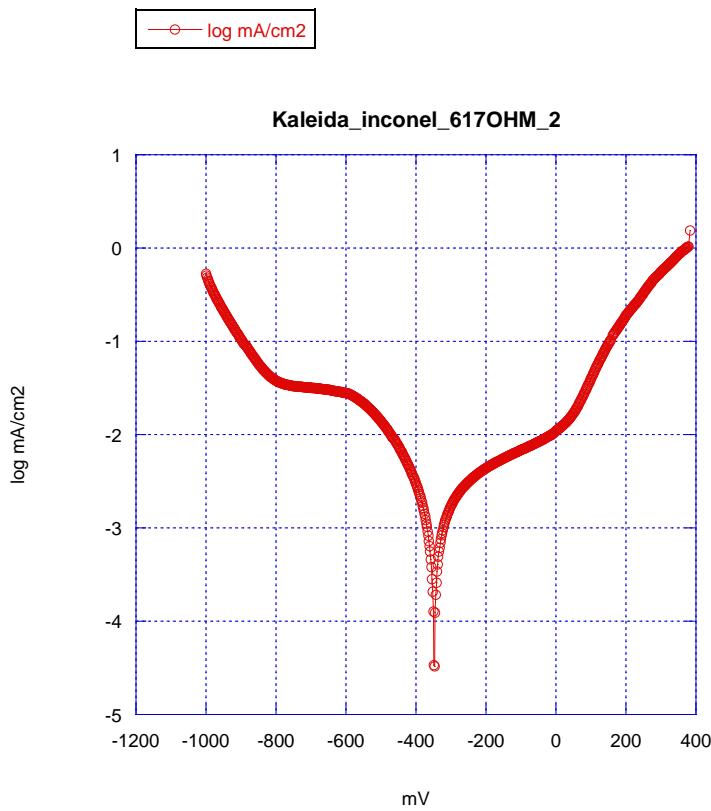


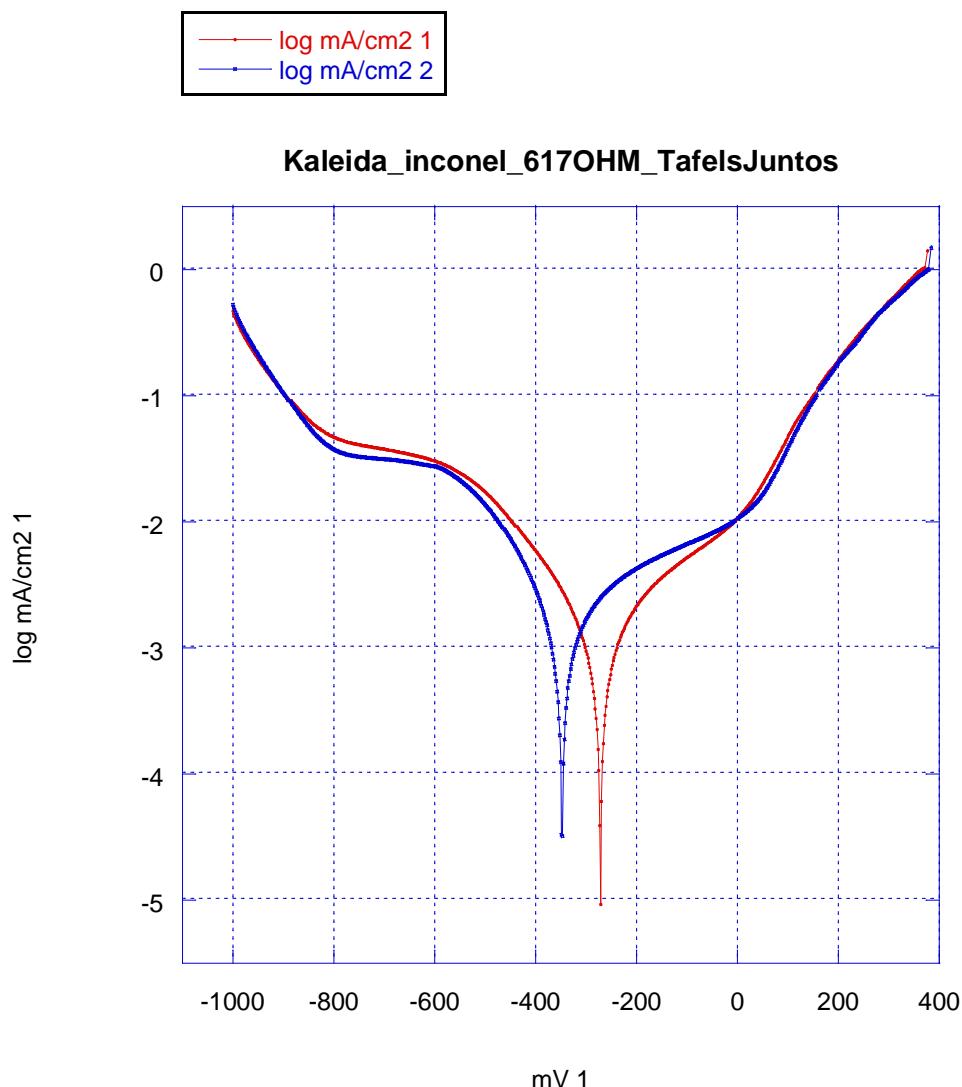




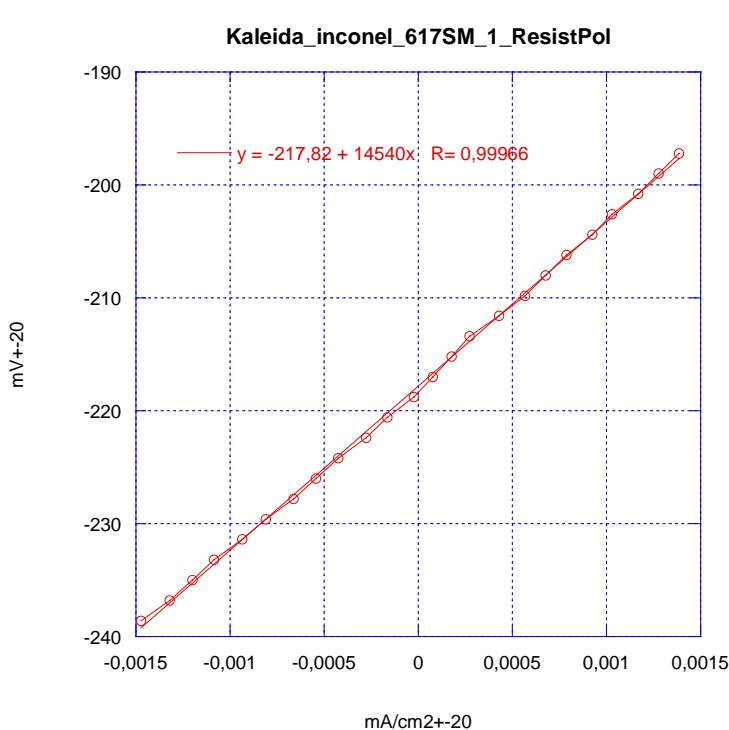
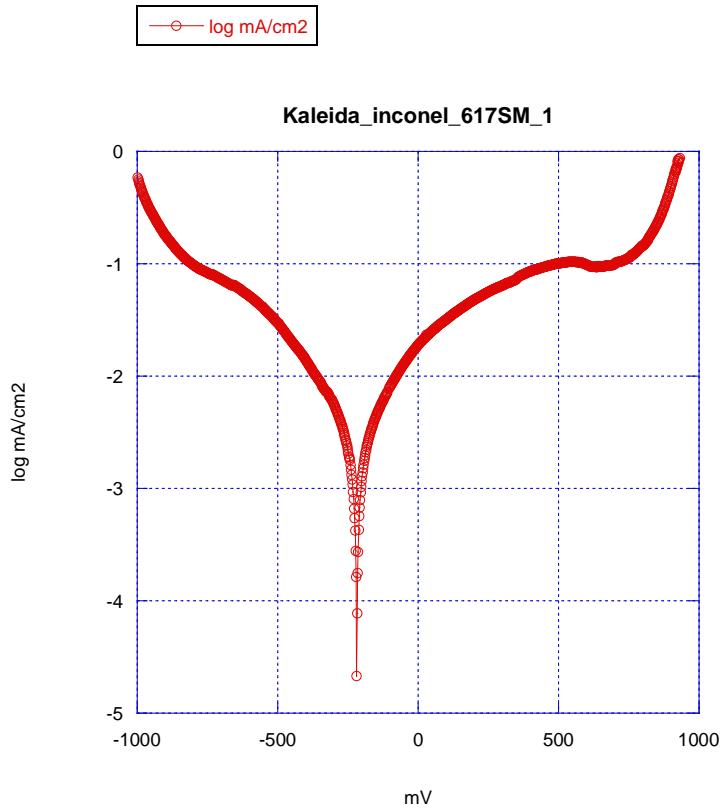
1.7.12. Inconel 617 OHM Pitting corrosion NaCl

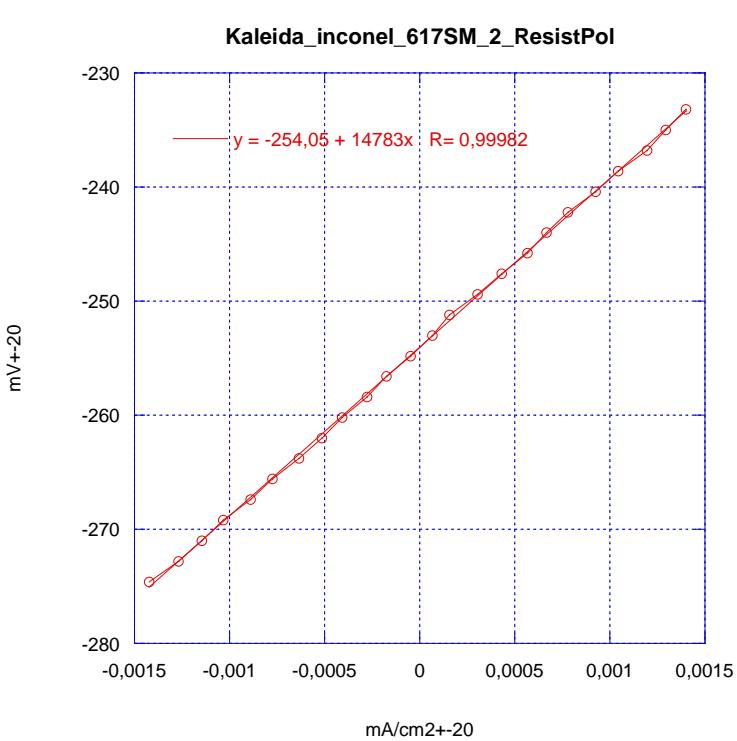
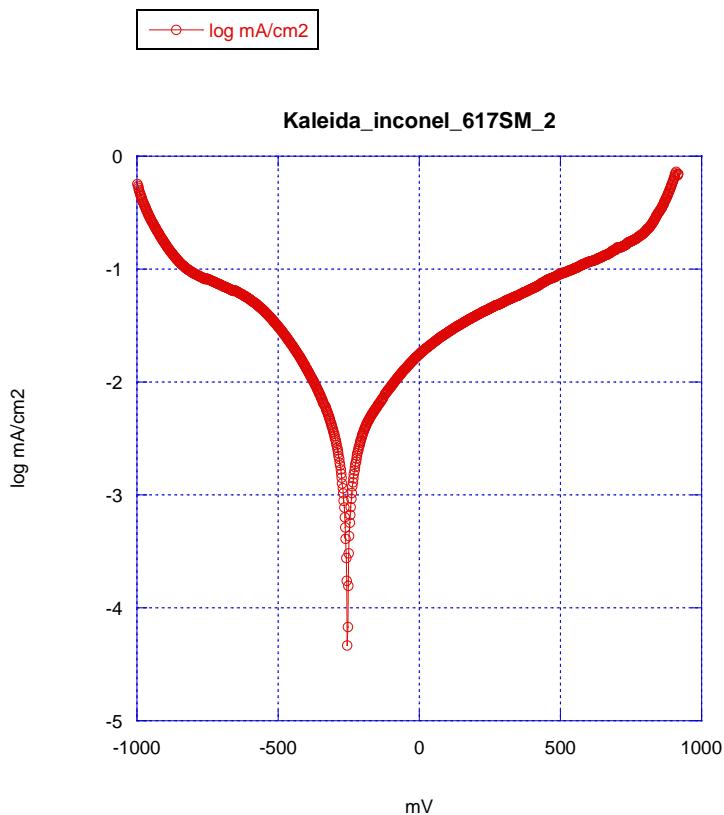


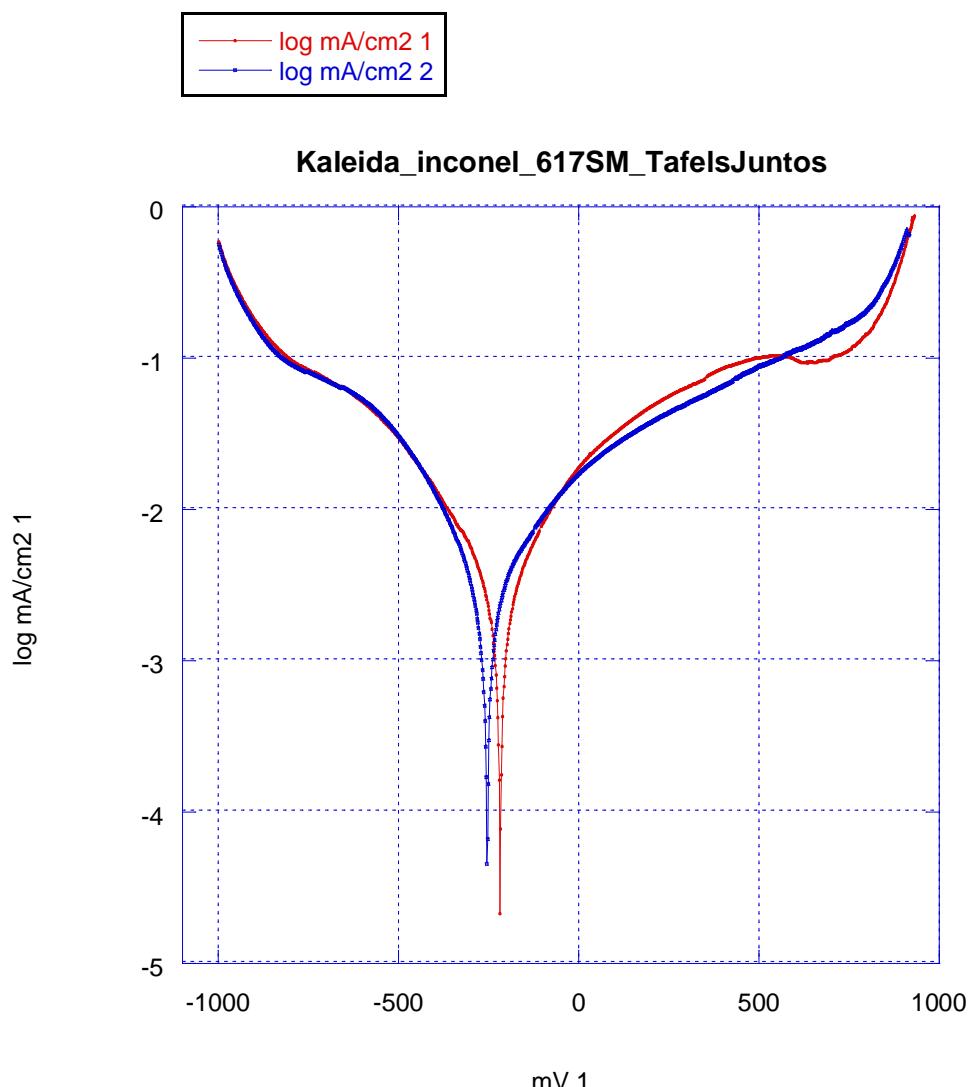




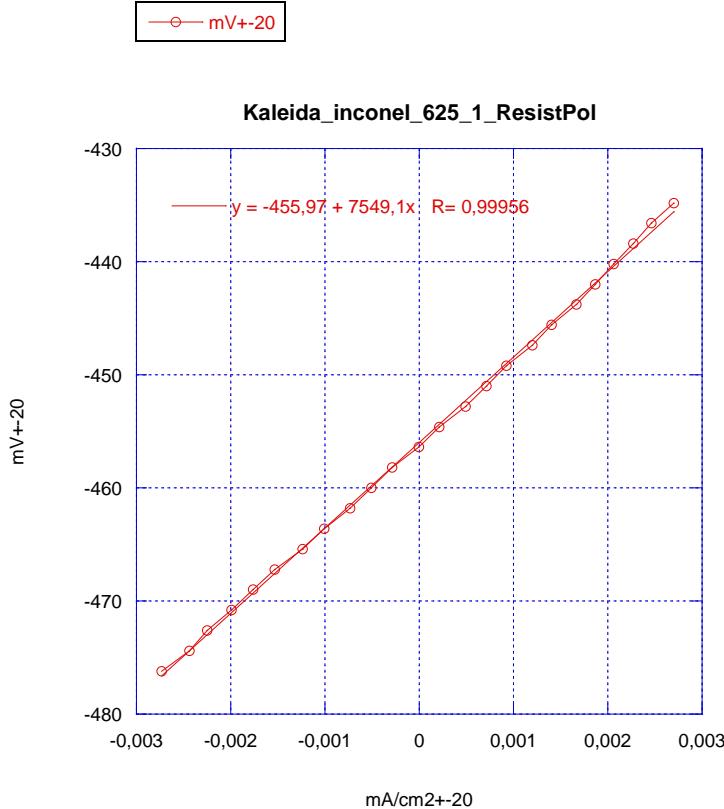
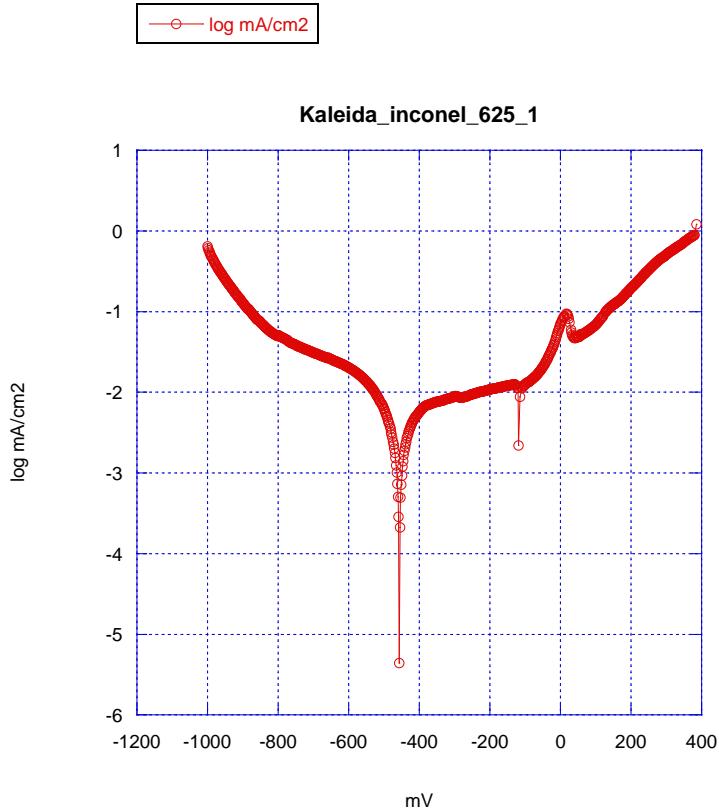
1.7.13. Inconel 617 SM Pitting corrosion NaCl

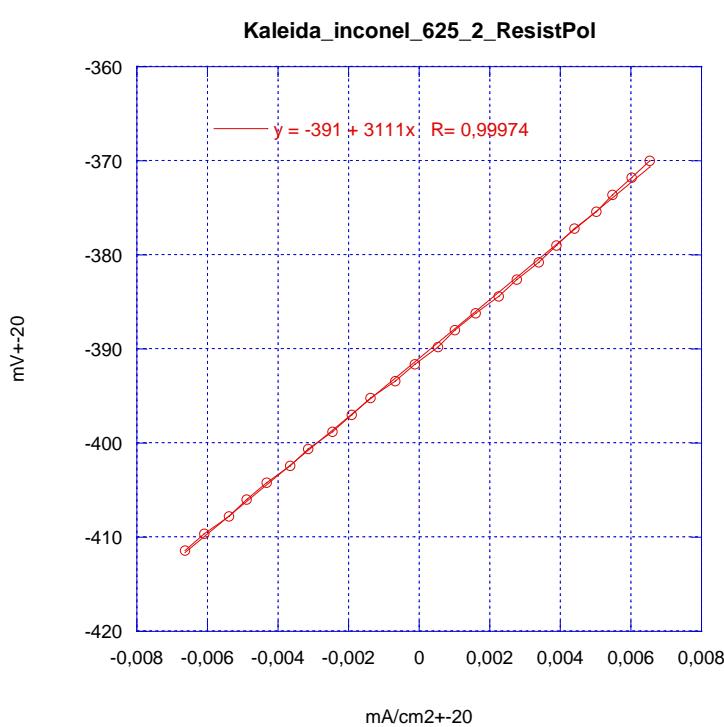
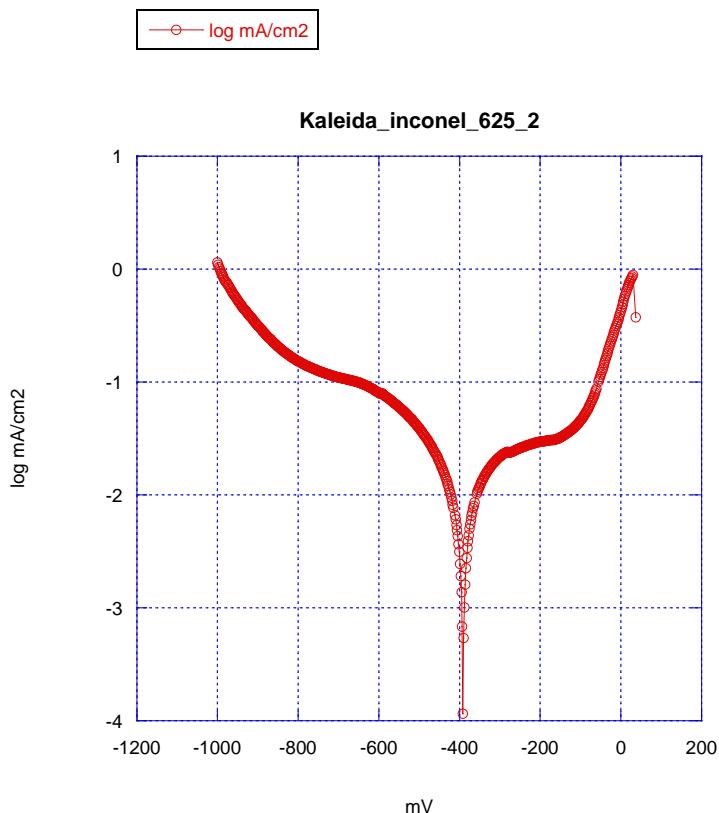


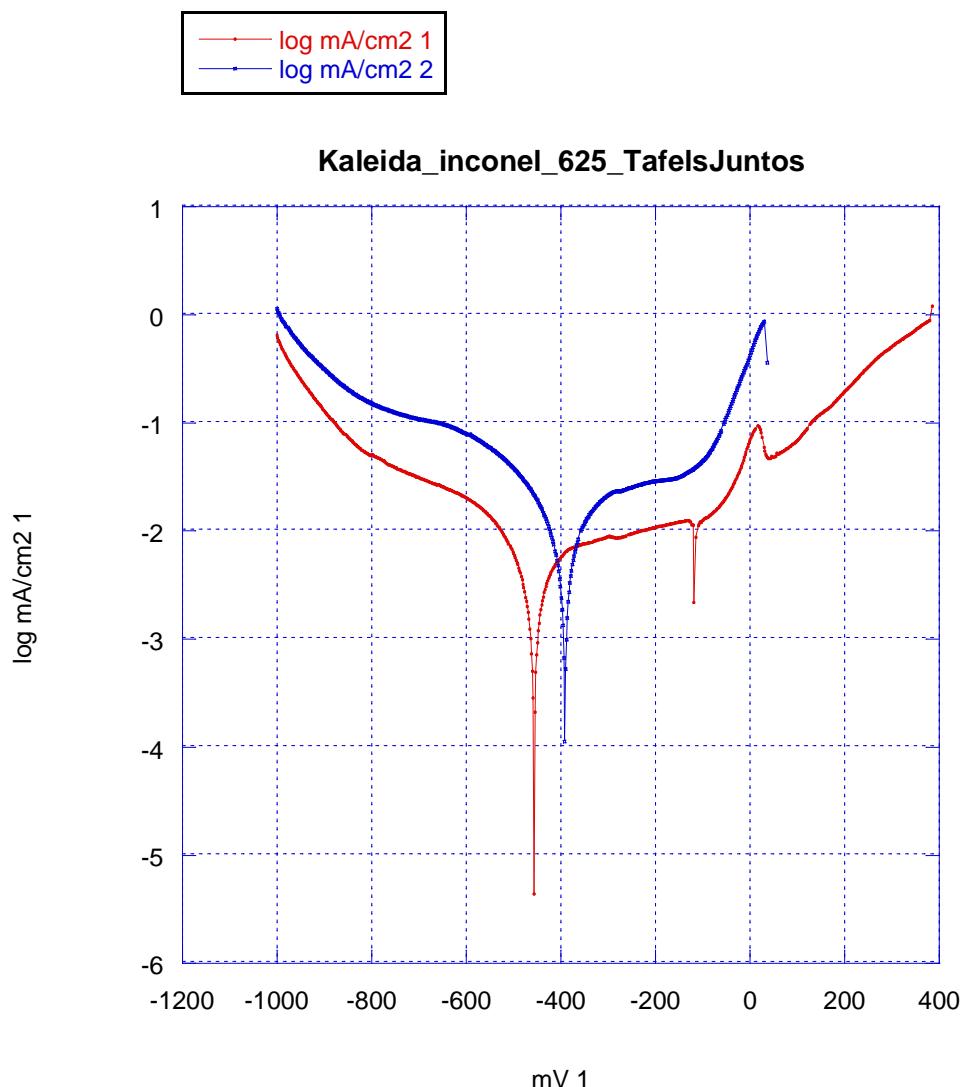




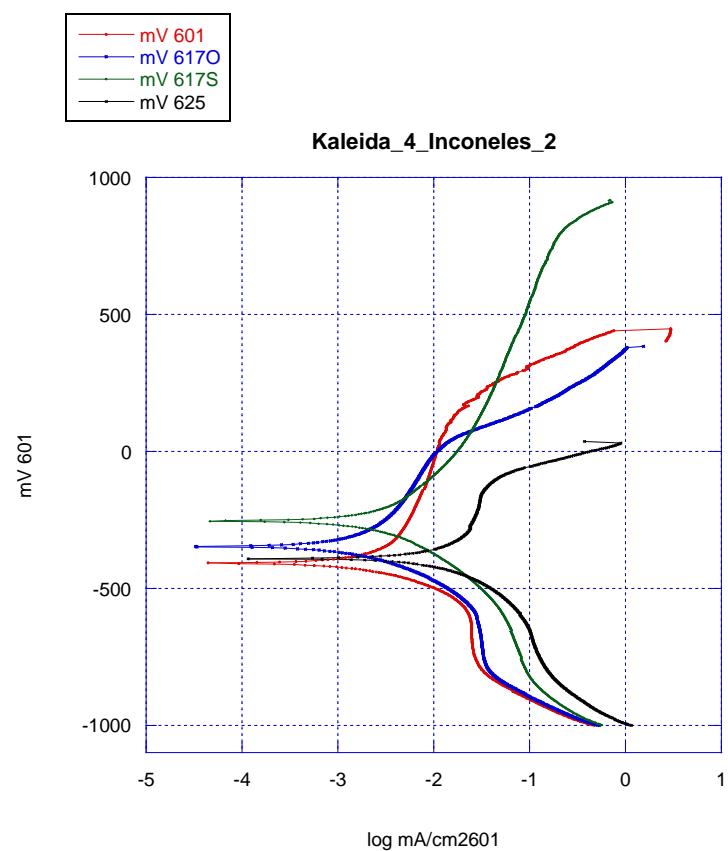
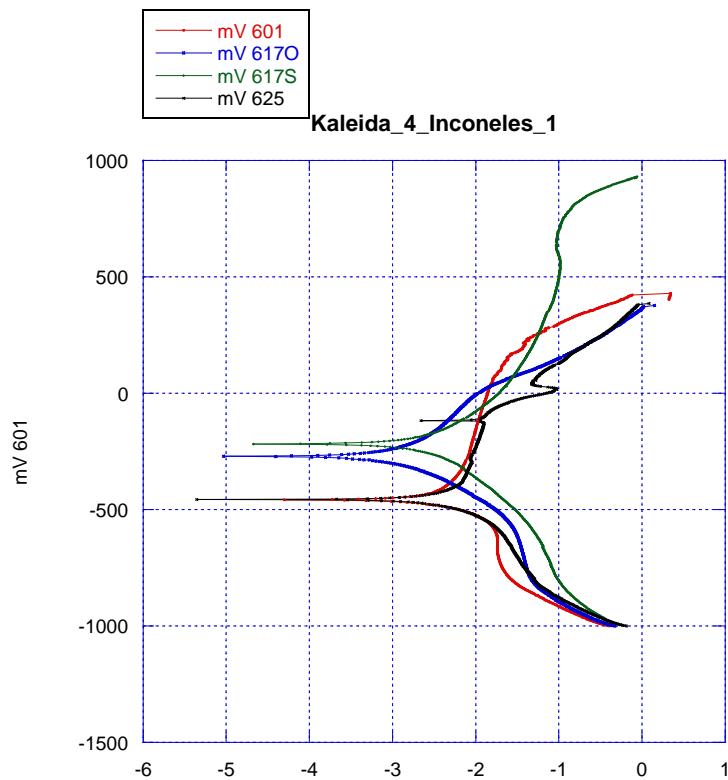
1.7.14. Inconel 625 Pitting corrosion NaCl



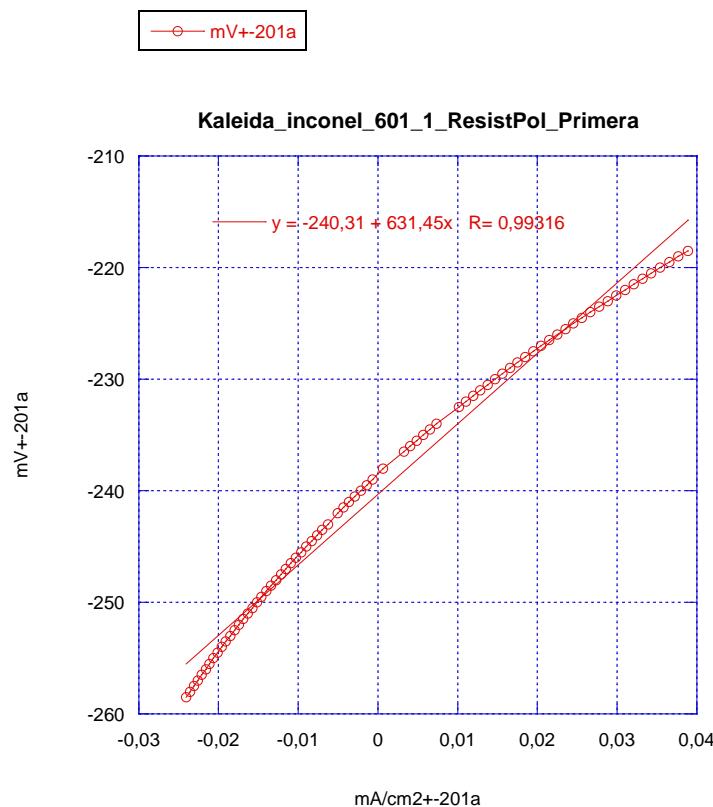
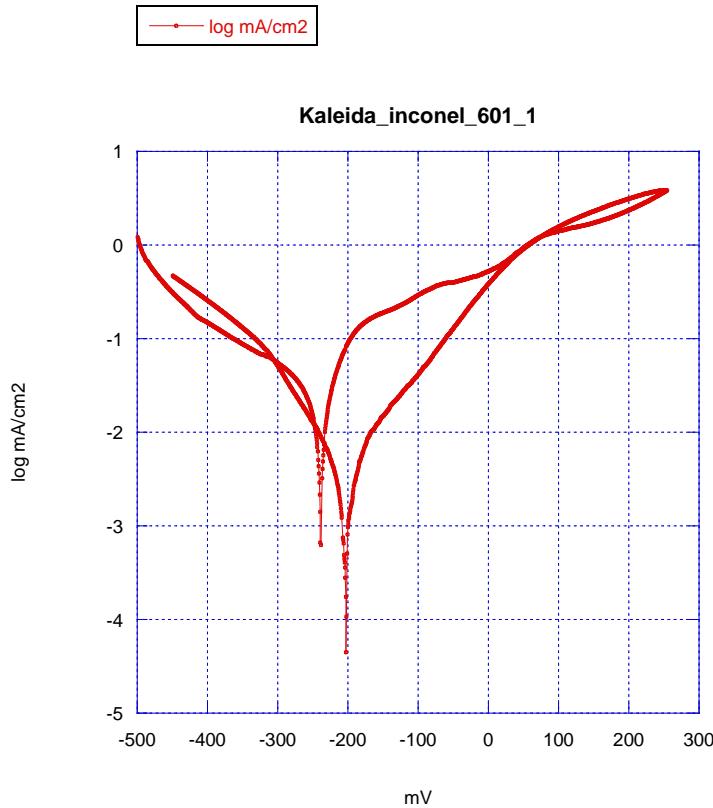


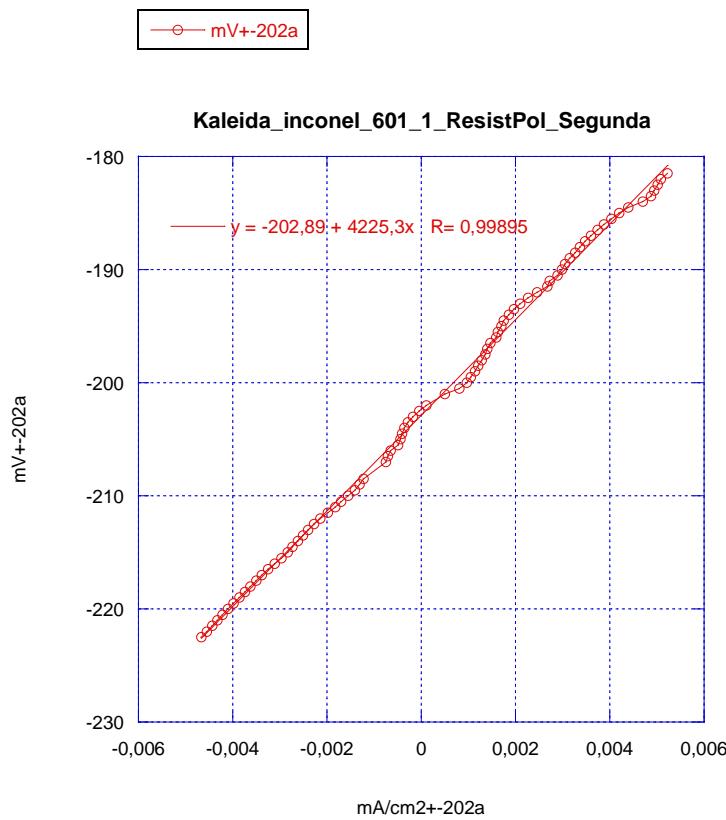


1.7.15. Comparación Inconeles Pitting corrosion NaCl

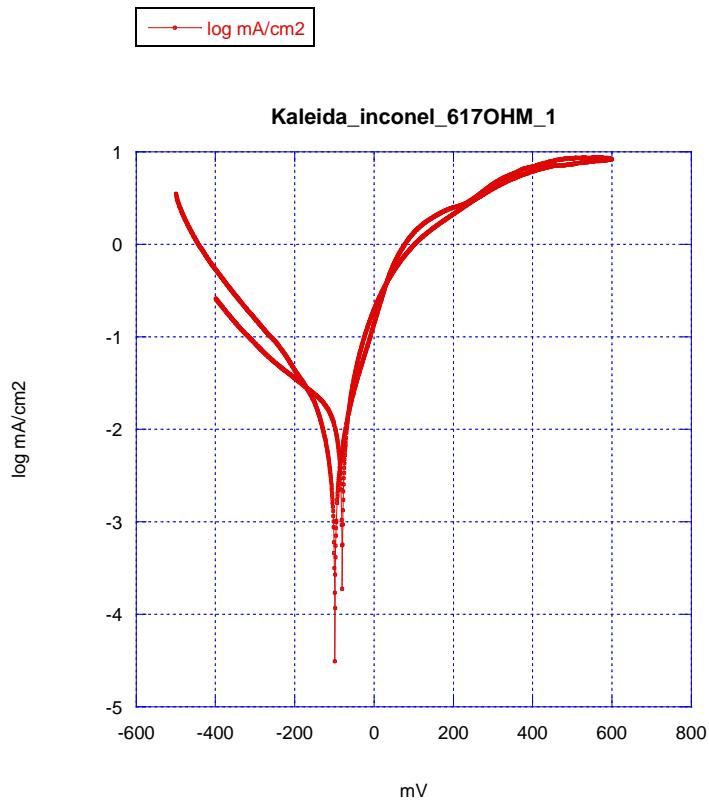


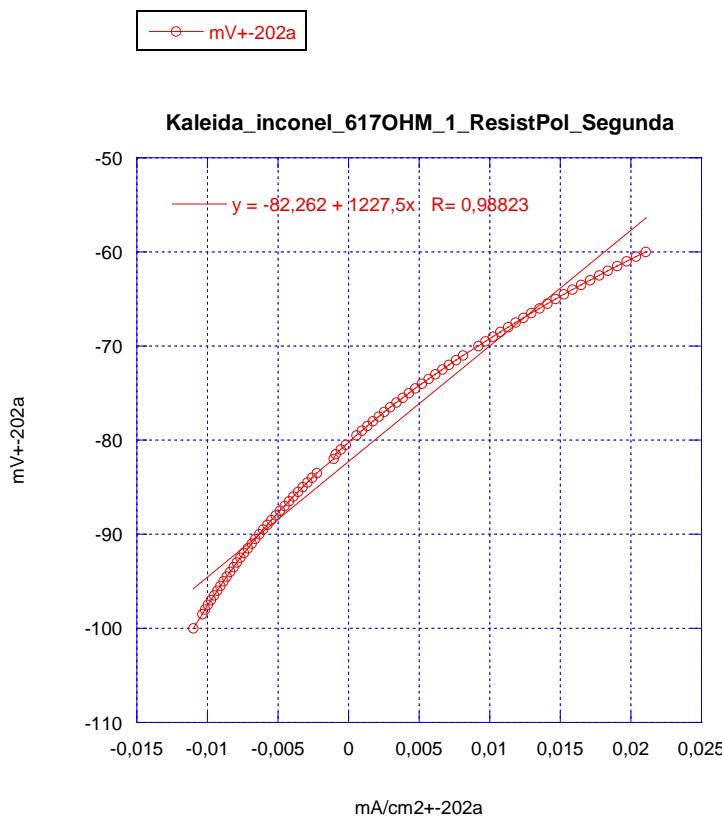
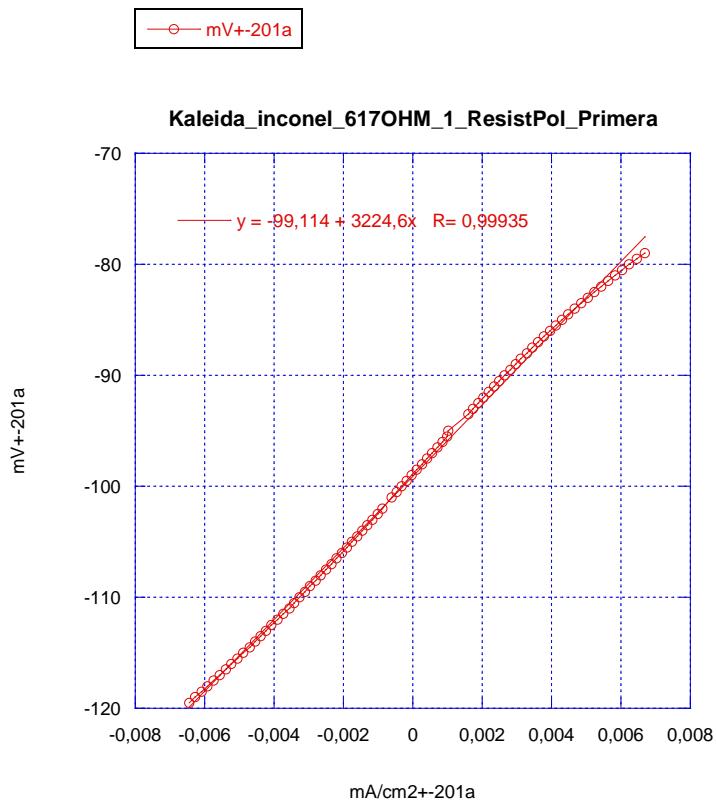
1.7.16. Inconel 601 Polarización cíclica HCl



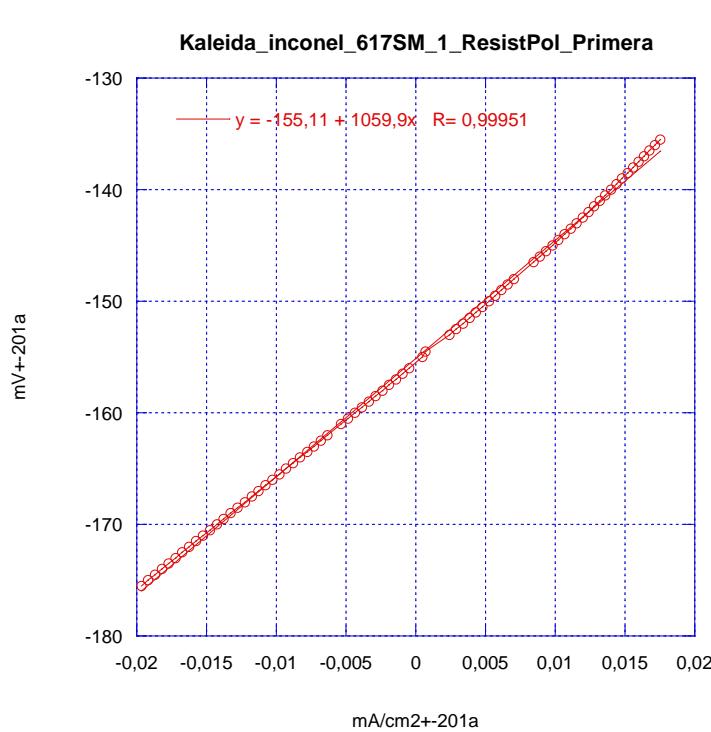
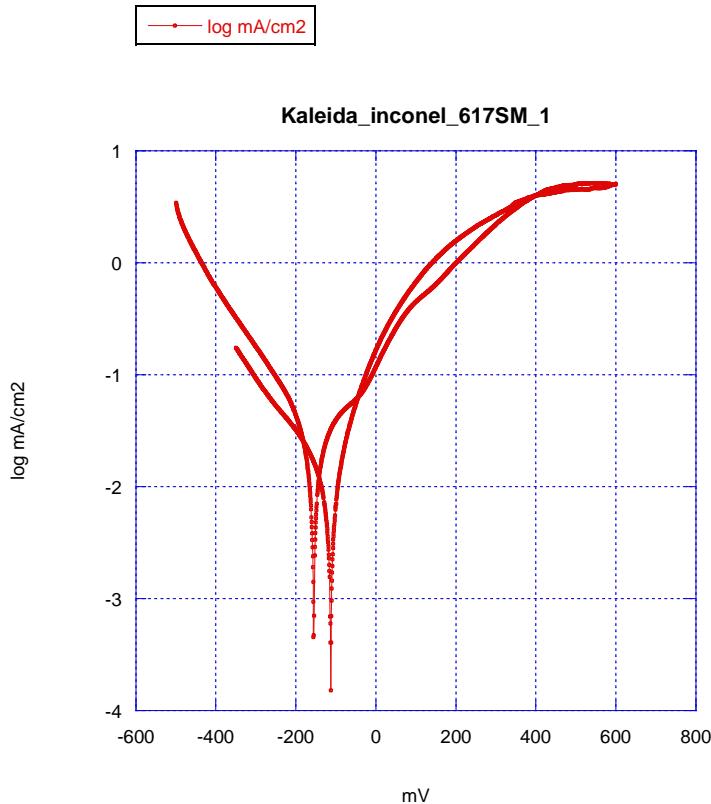


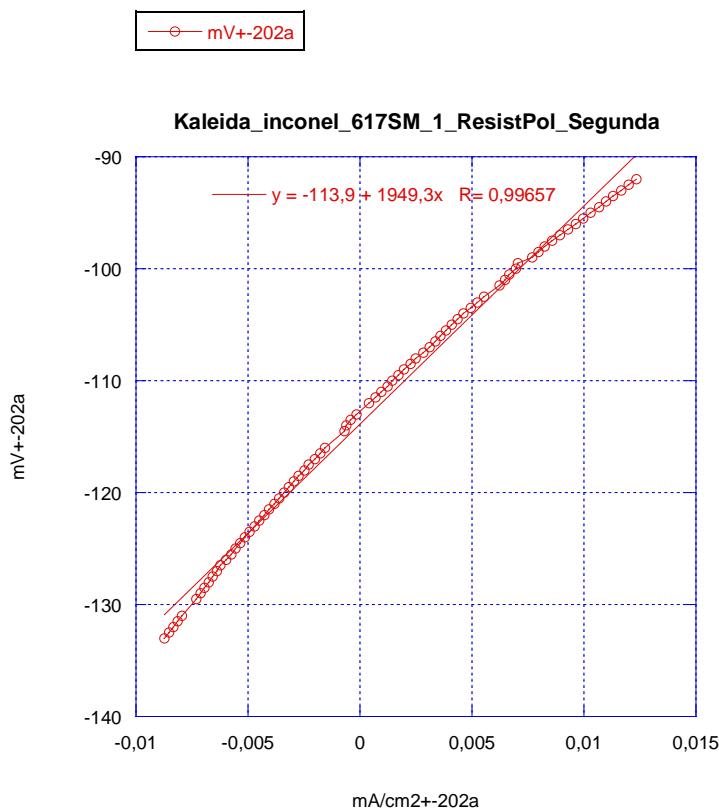
1.7.17. Inconel 617 OHM Polarización cíclica HCl



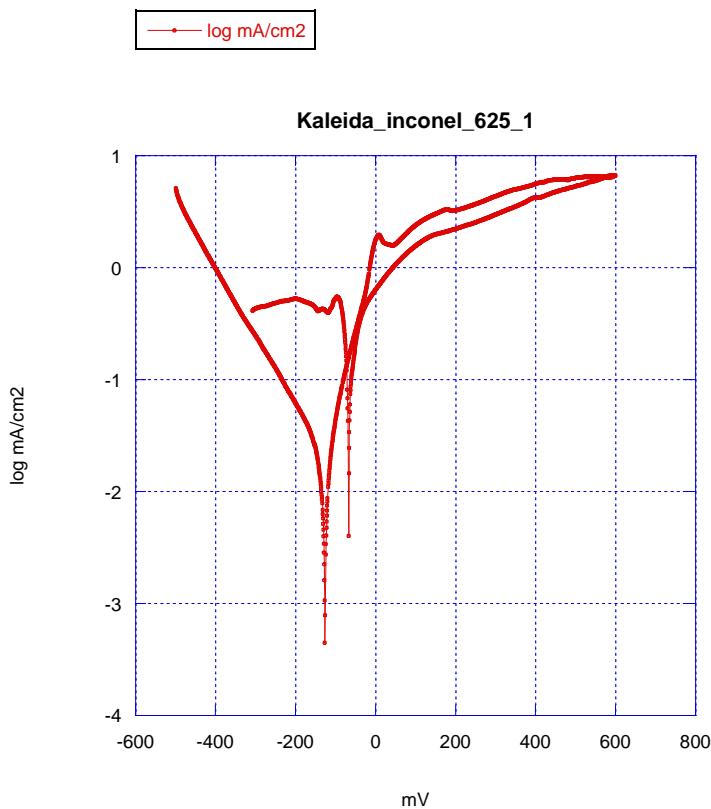


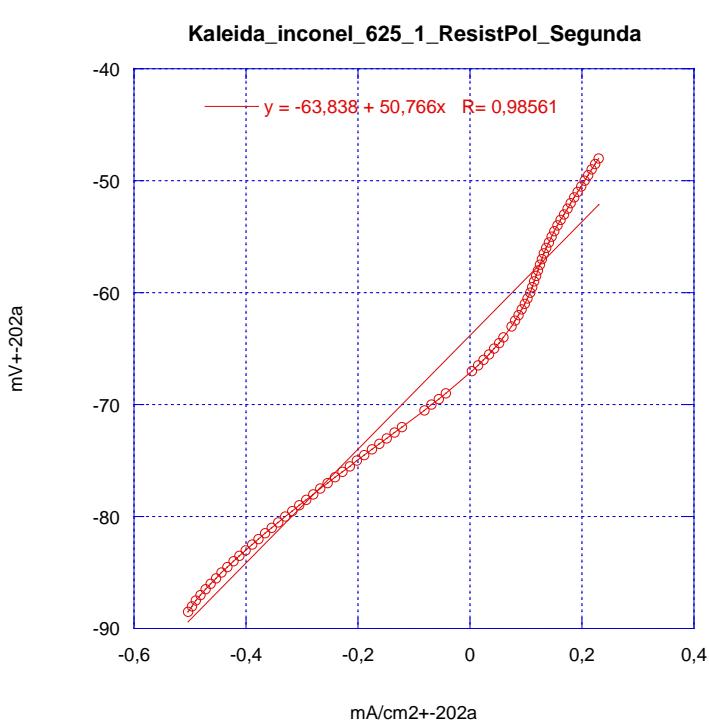
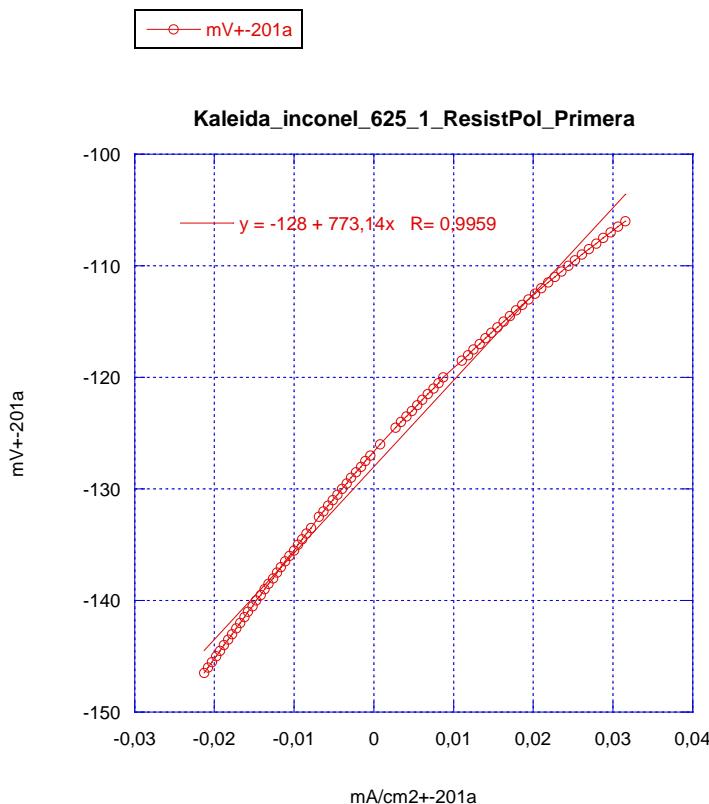
1.7.18. Inconel 617 SM Polarización cíclica HCl



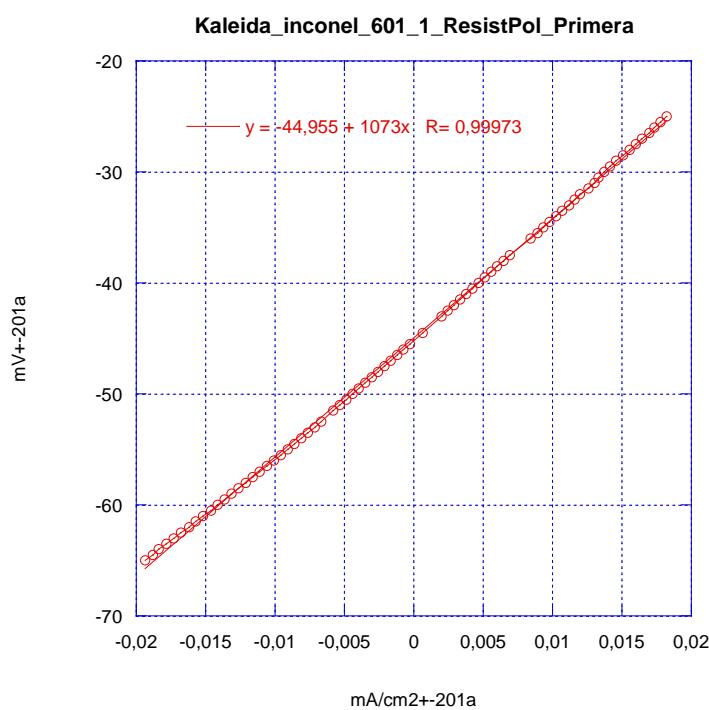
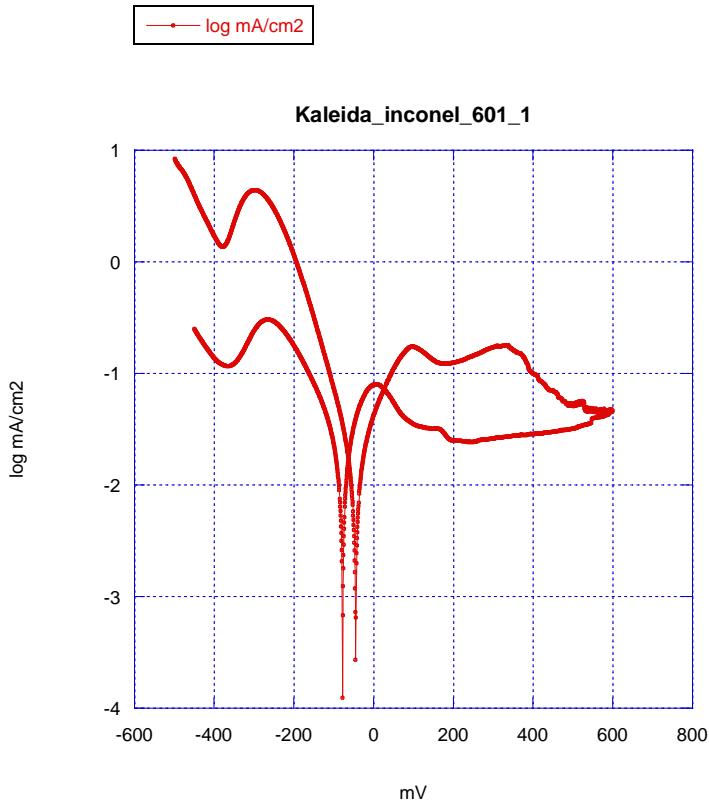


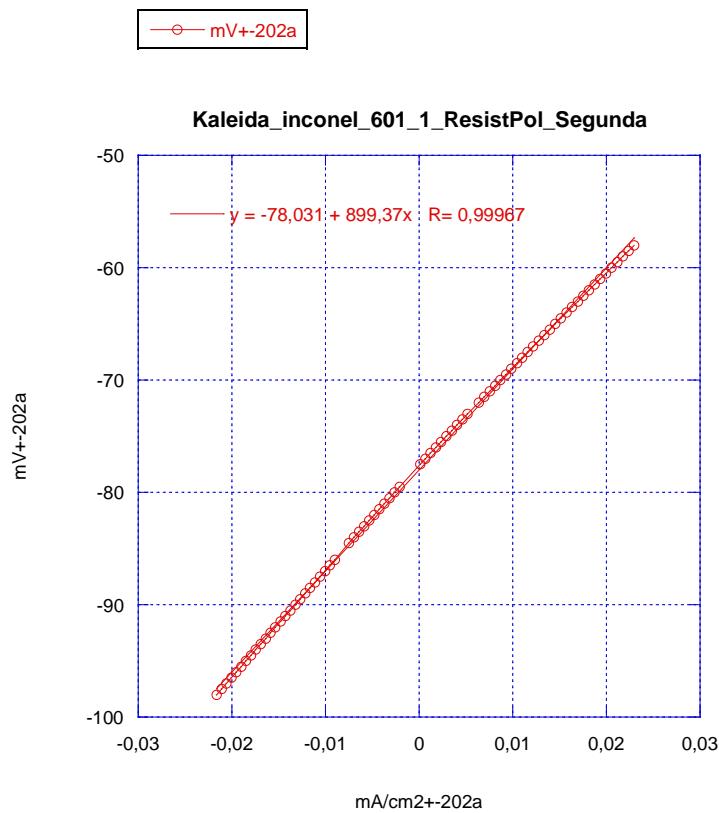
1.7.19. Inconel 625 Polarización cíclica HCl



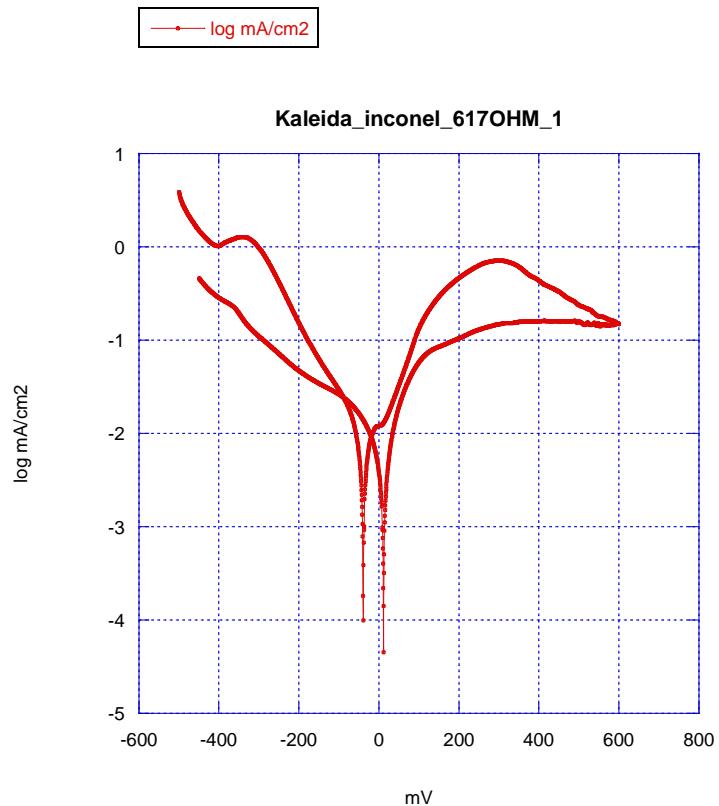


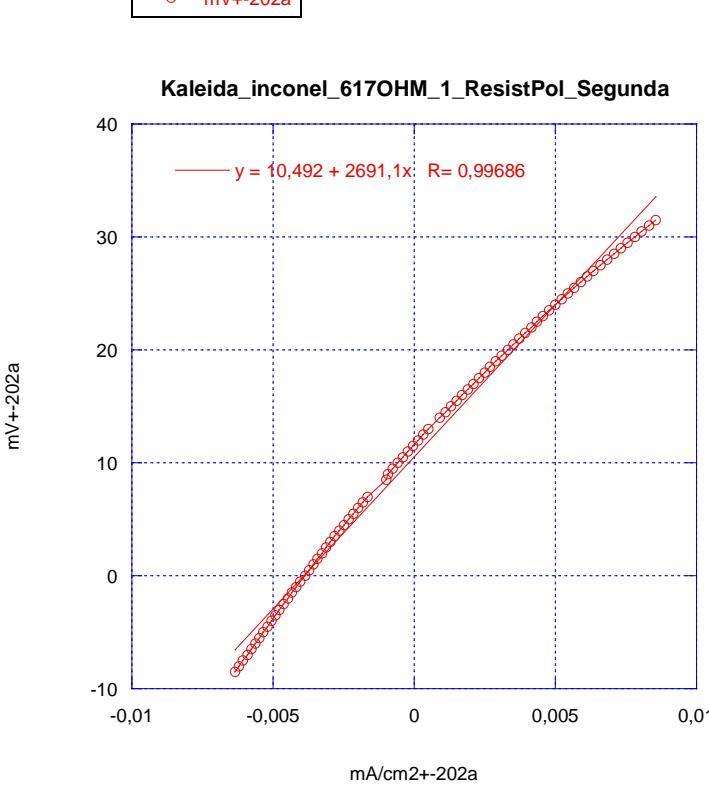
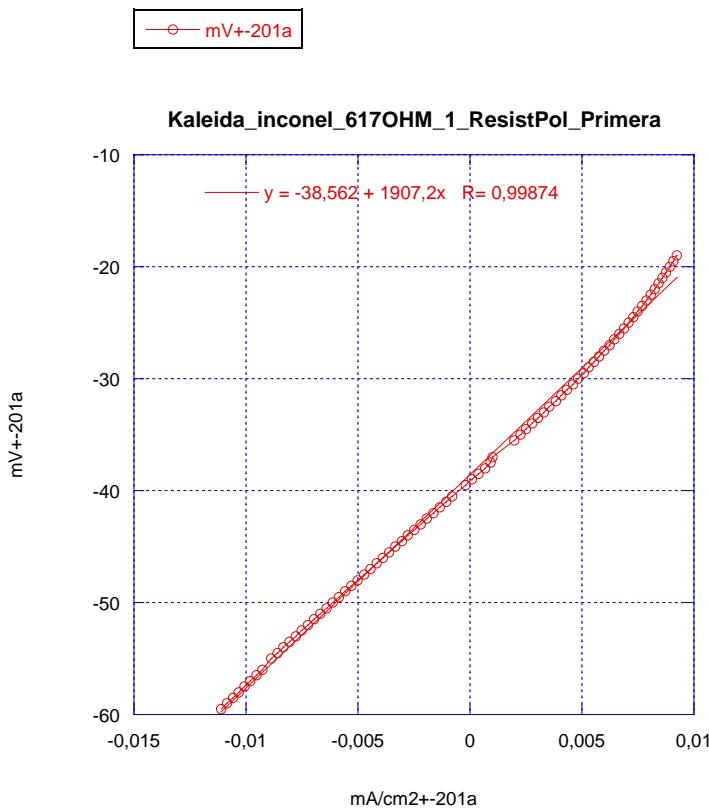
1.7.20. Inconel 601 Polarización cíclica HNO₃



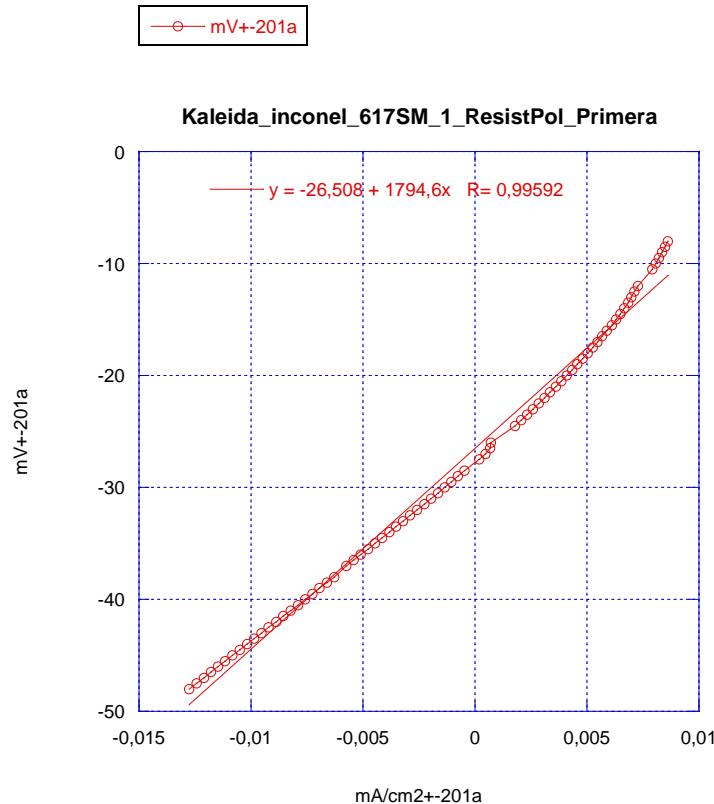
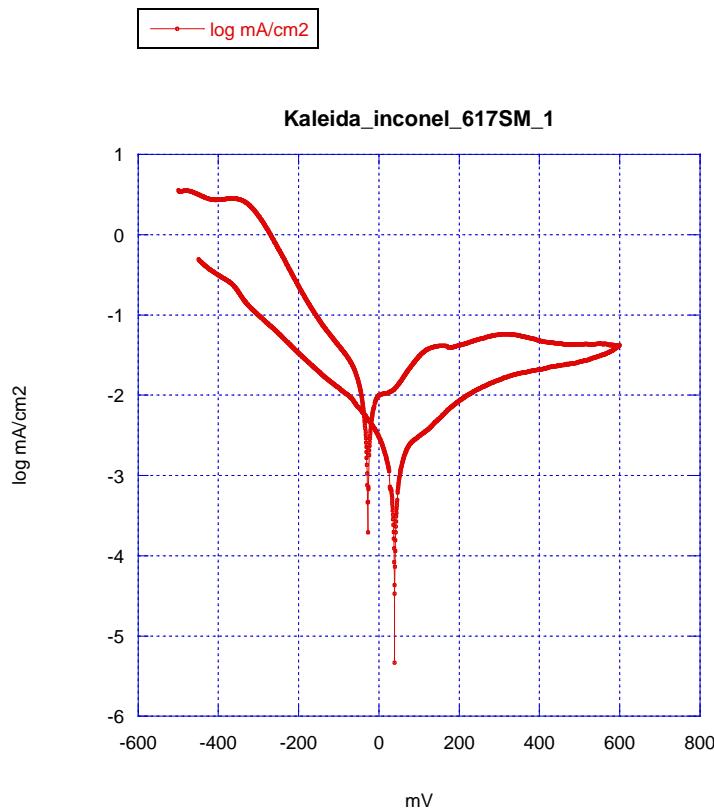


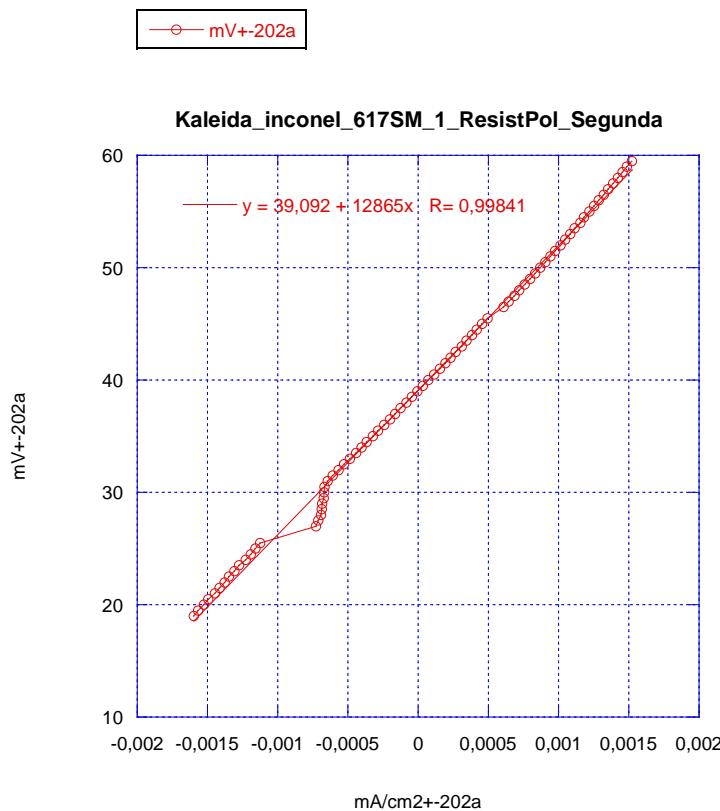
1.7.21. Inconel 617 OHM Polarización cíclica HNO₃



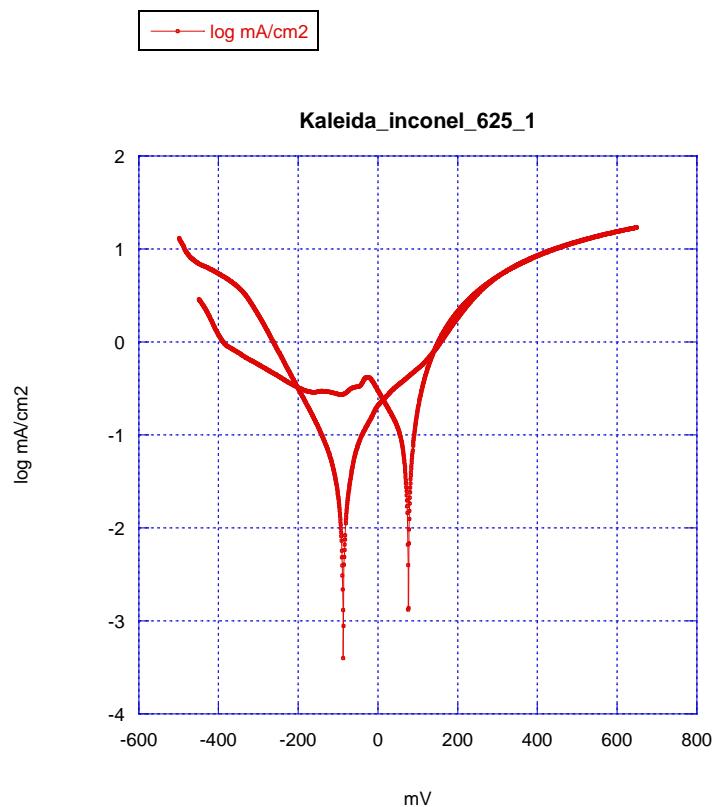


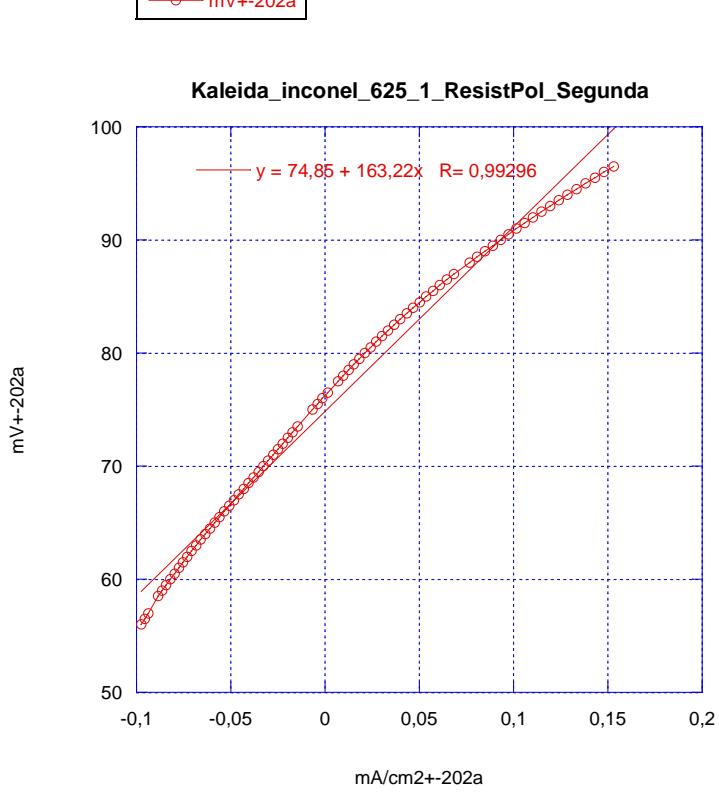
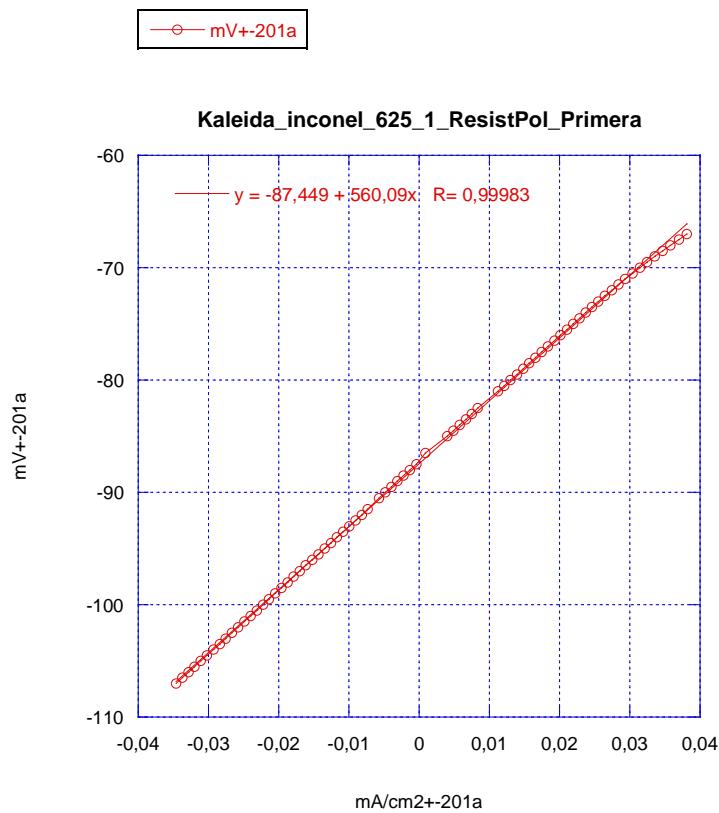
1.7.22. Inconel 617 SM Polarización cíclica HNO₃



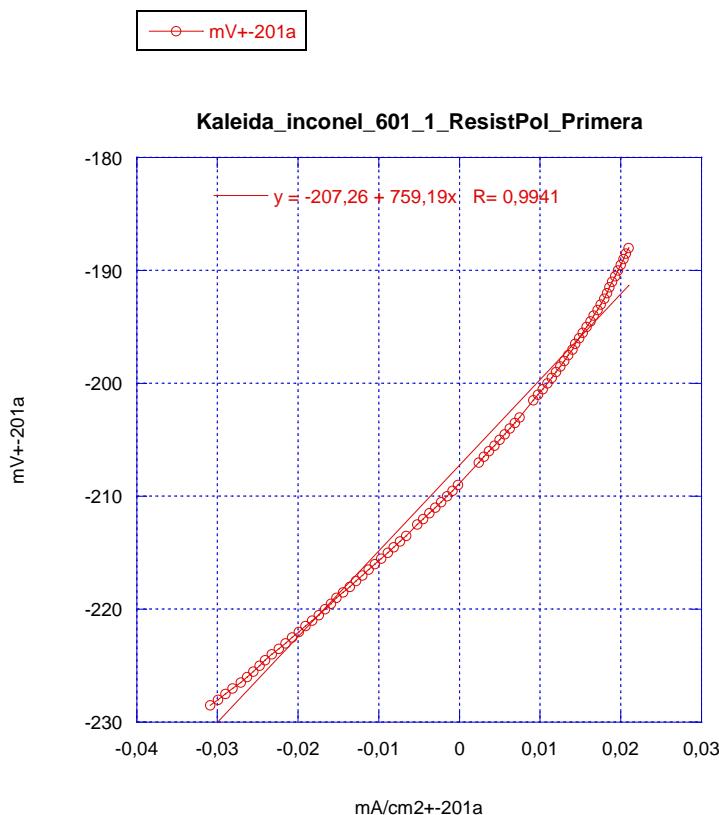
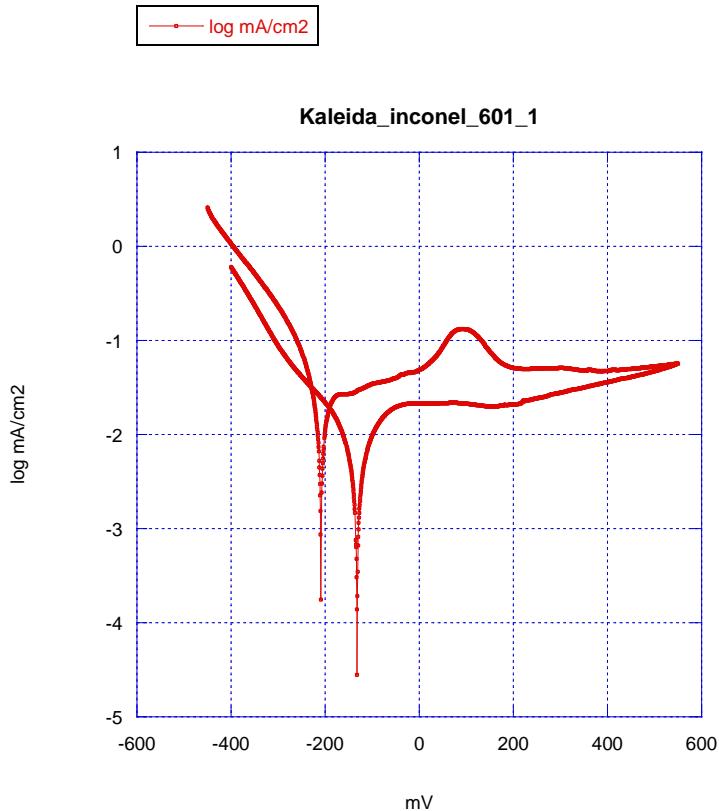


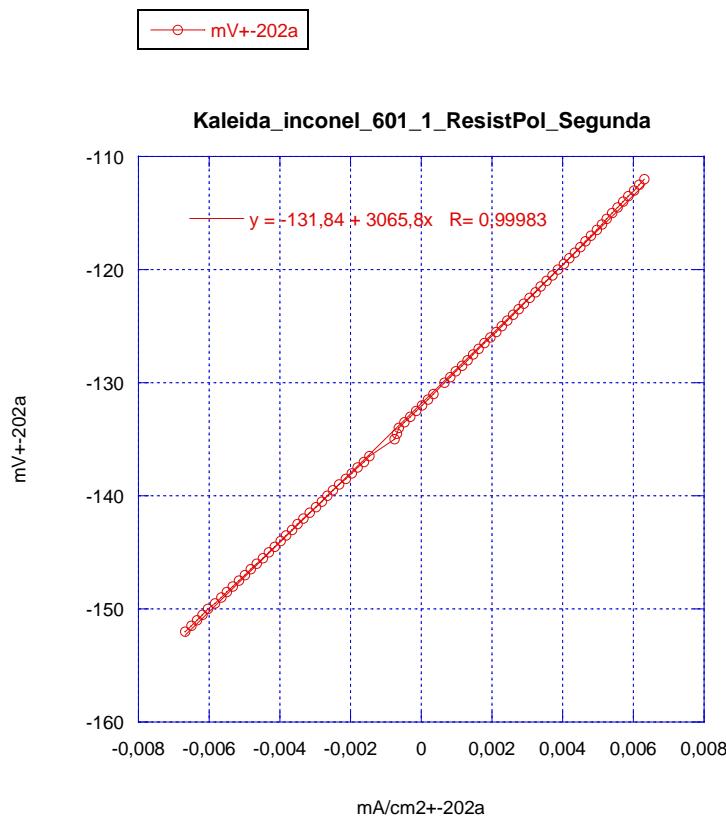
1.7.23. Inconel 625 Polarización cíclica HNO₃



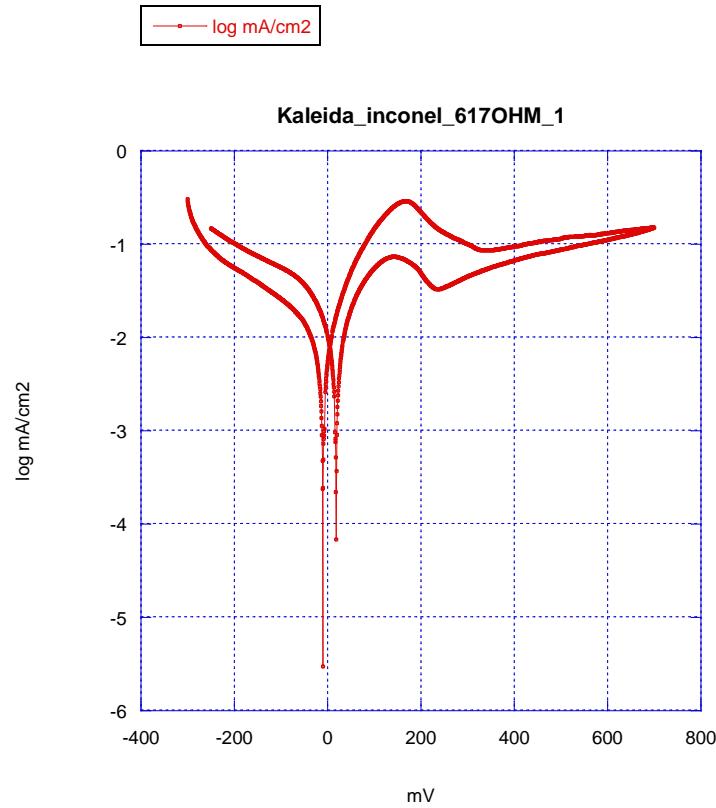


1.7.24. Inconel 601 Polarización cíclica NaCl



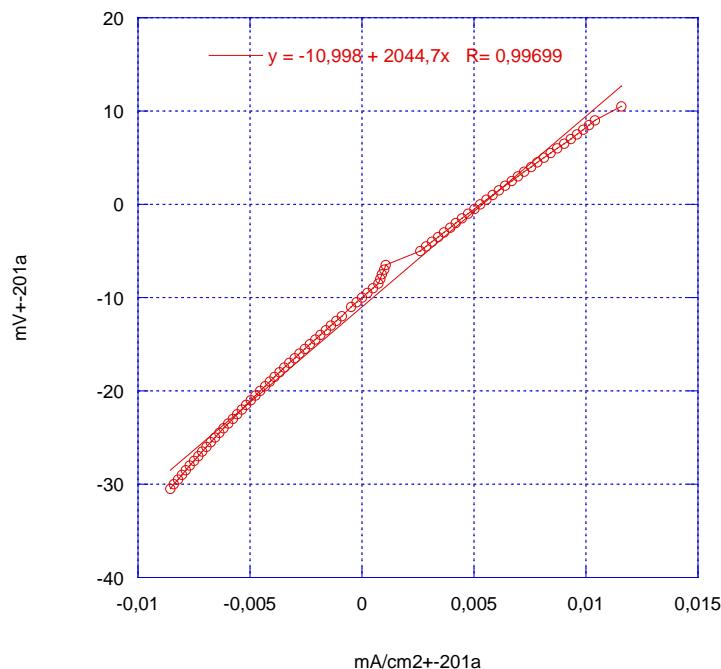


1.7.25. Inconel 617 OHM Polarización cíclica NaCl



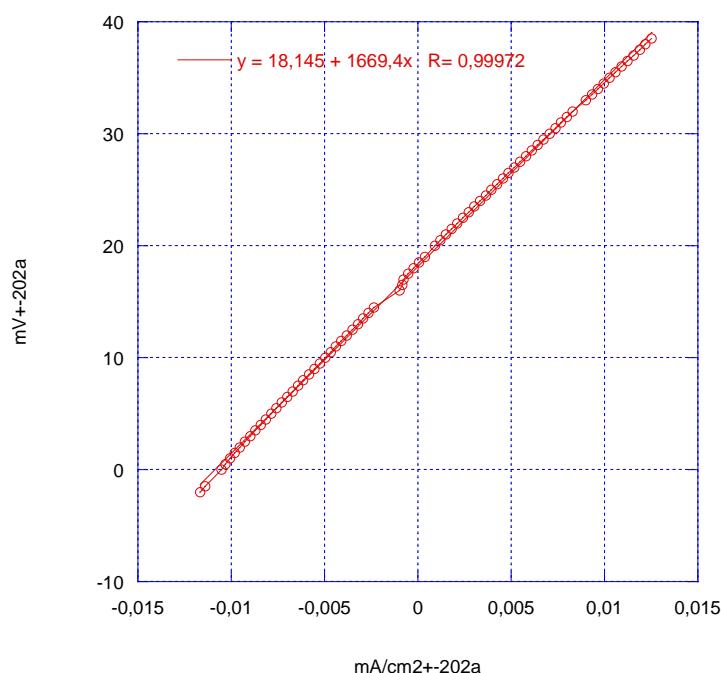
—○— mV+-201a

Kaleida_inconel_617OHM_1_ResistPol_Primera

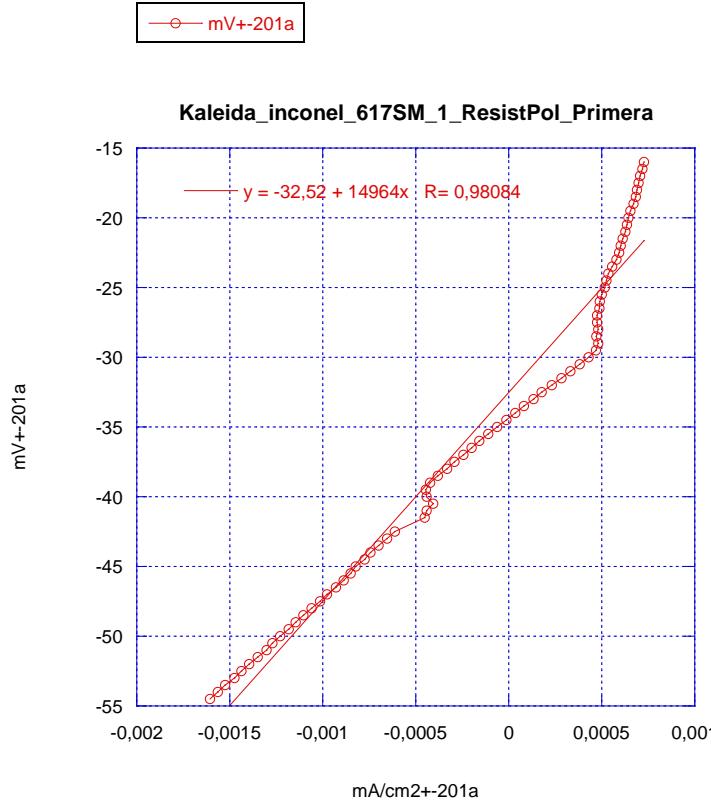
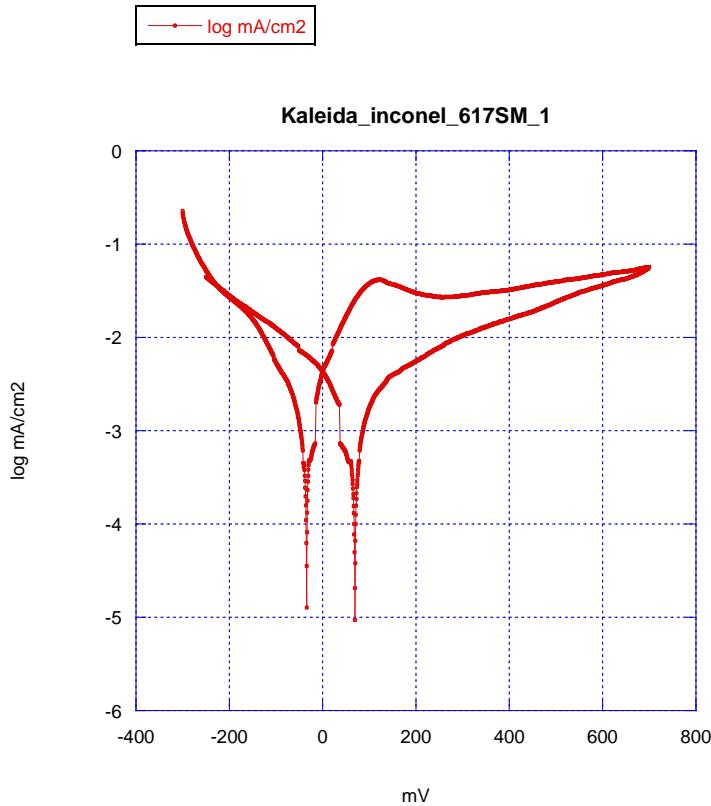


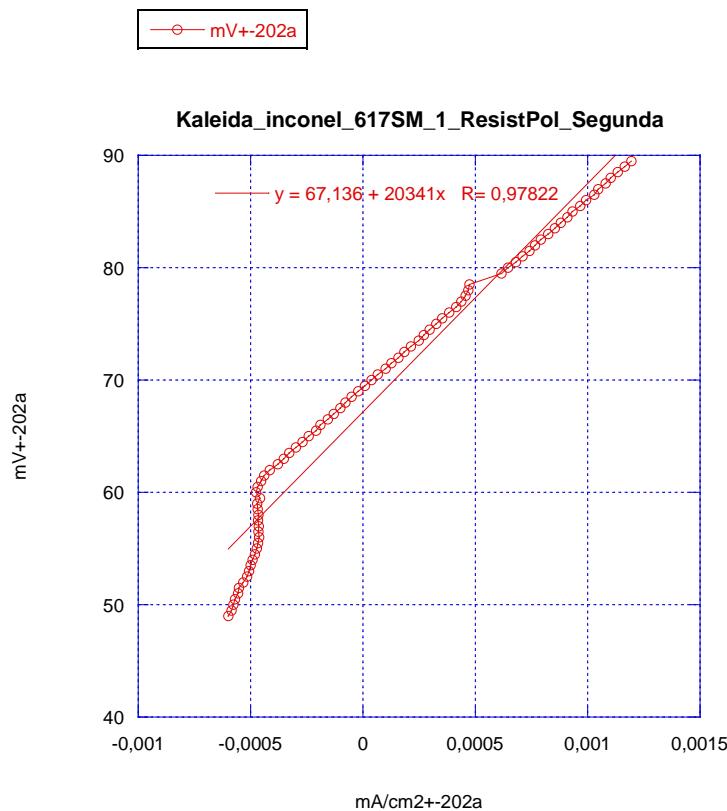
—○— mV+-202a

Kaleida_inconel_617OHM_1_ResistPol_Segunda

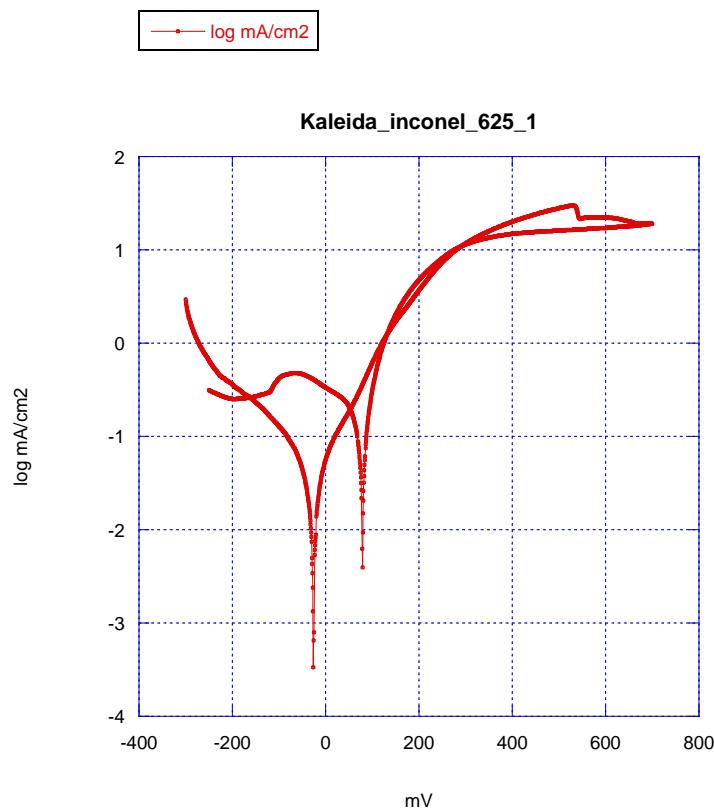


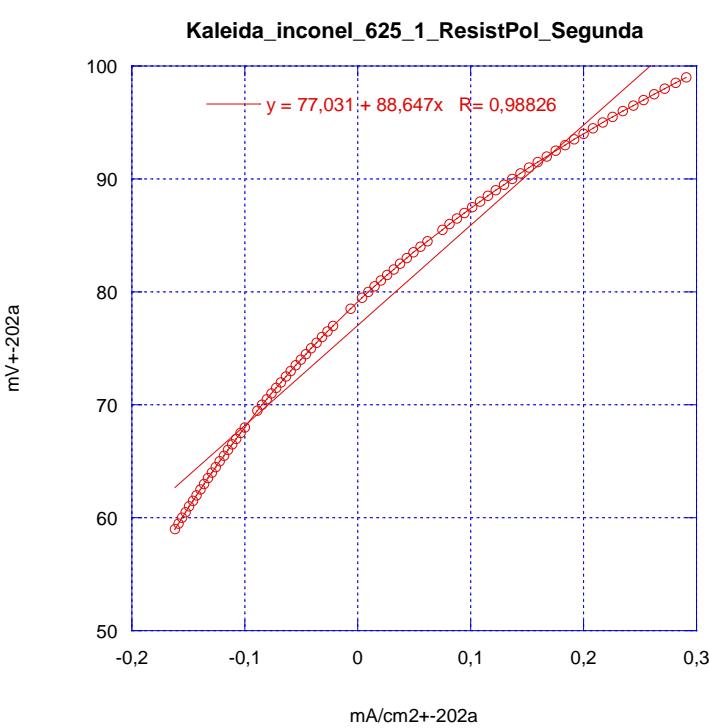
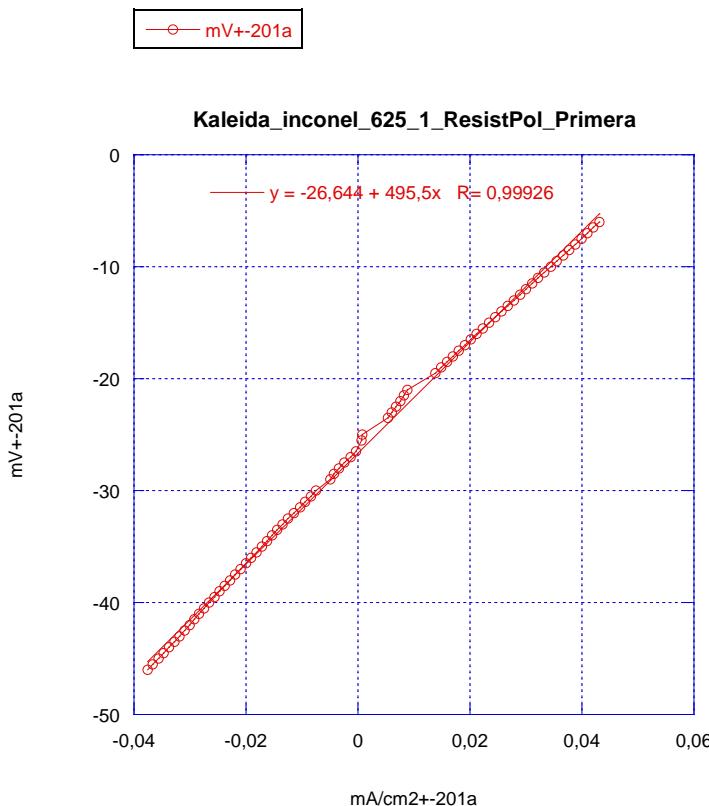
1.7.26. Inconel 617 SM Polarización cíclica NaCl



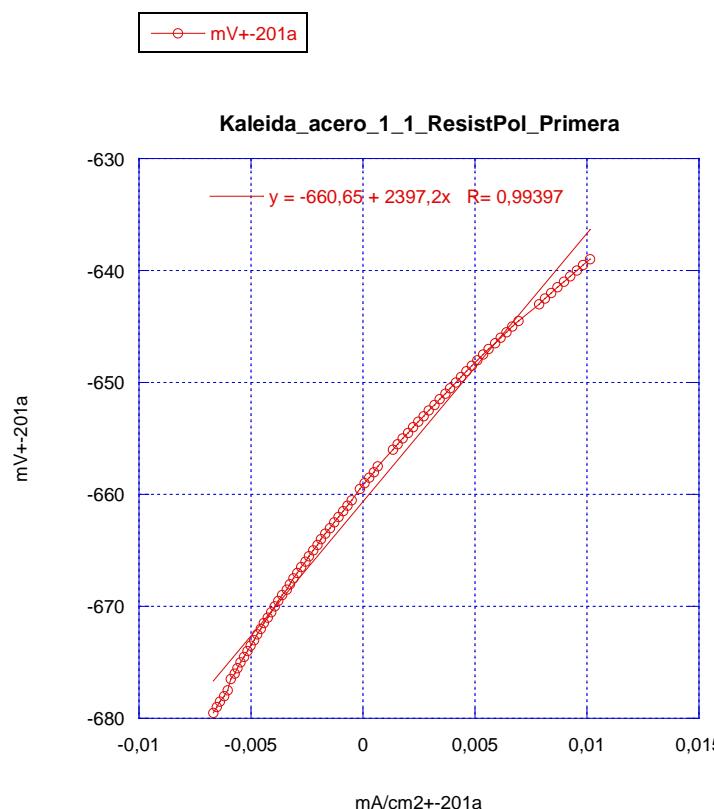
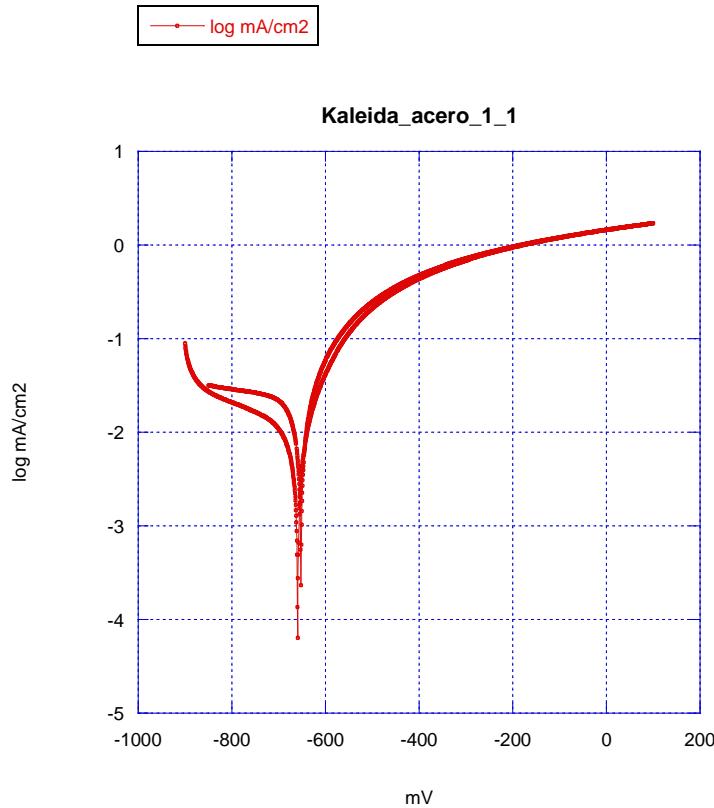


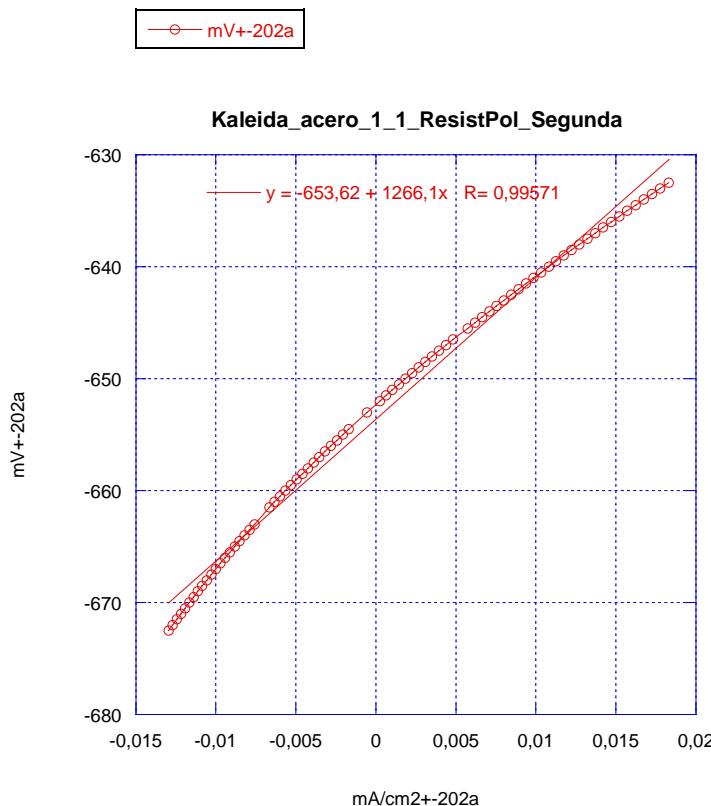
1.7.27. Inconel 625 Polarización cíclica NaCl



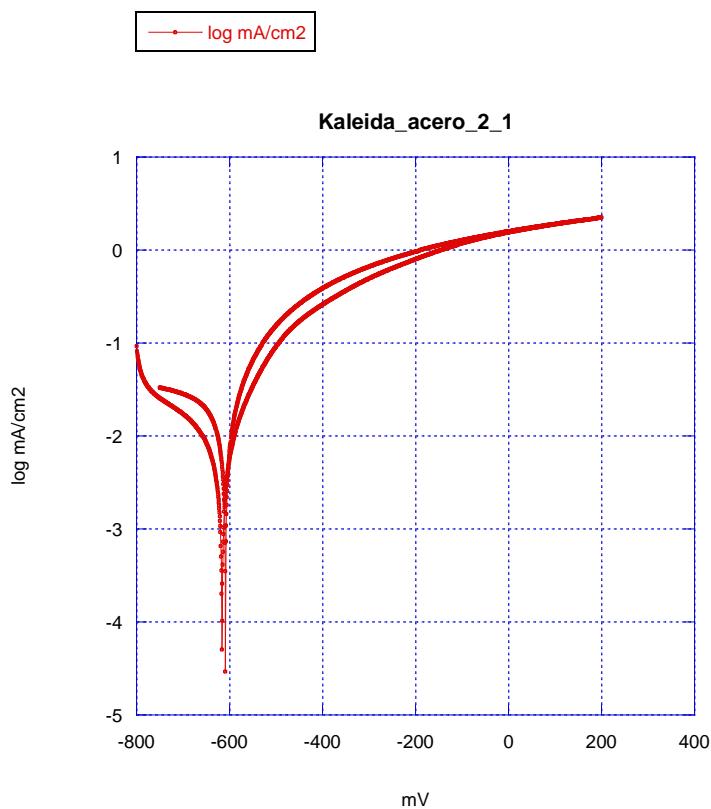


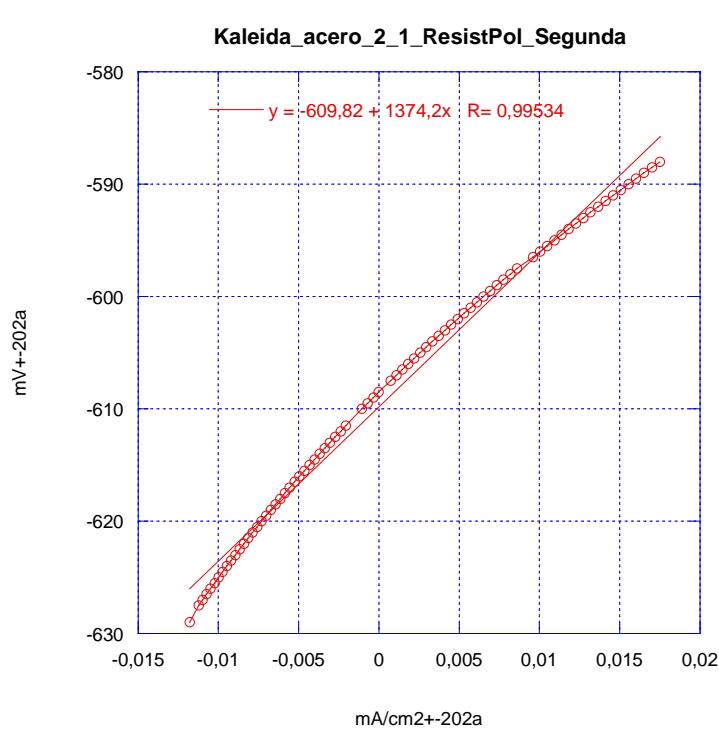
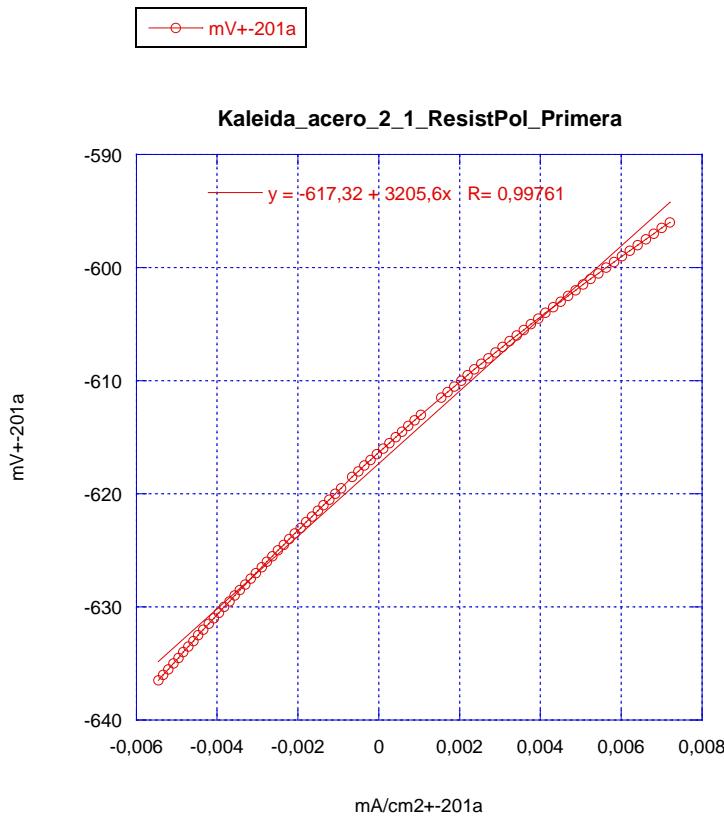
1.7.28. Fundición nodular con cierta degeneración Polarización cíclica Agua potable



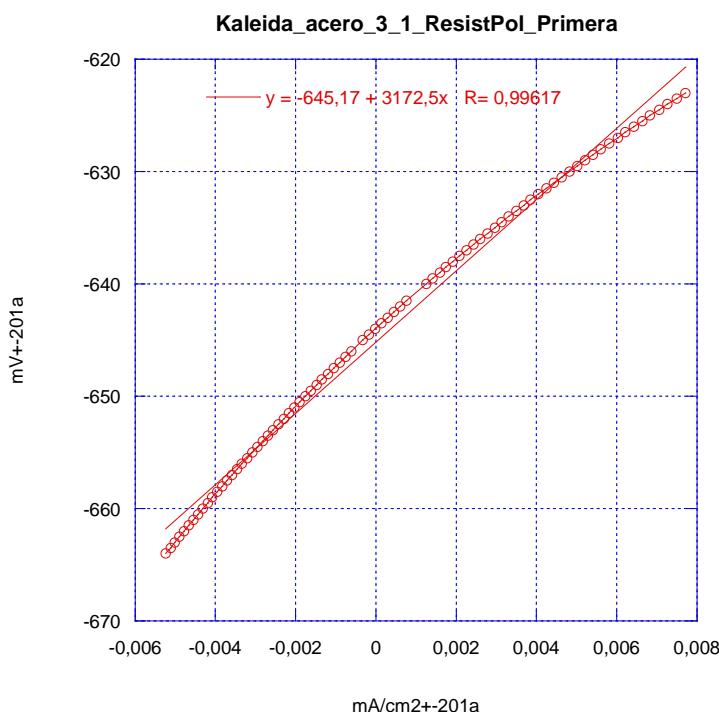
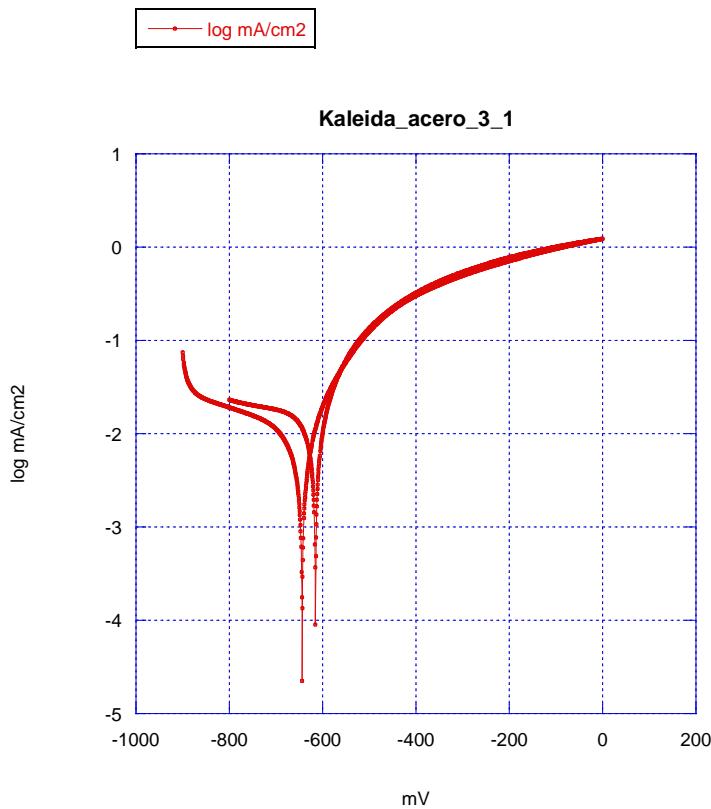


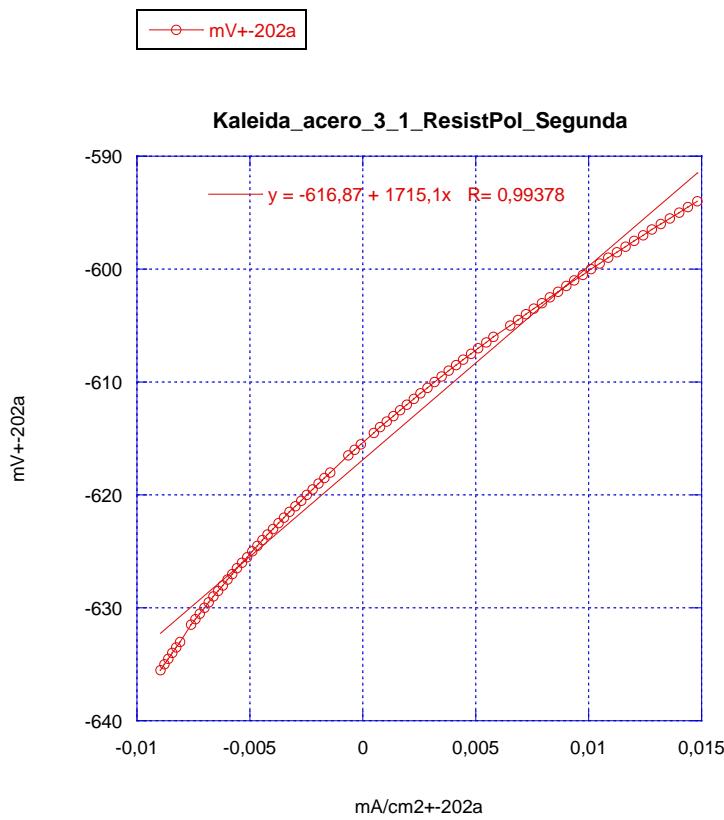
1.7.29. Acero ferrito-perlítico de medio-alto carbono Polarización cíclica Agua potable





1.7.30. Acero templado y revenido Polarización cíclica Agua potable





1.7.31. Acero ferrítico Polarización cíclica Agua potable

