



Universidad de Valladolid



**COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO DE
MATERIALES POROSOS PARA LA
FABRICACIÓN DE PRÓTESIS**

PROYECTO FIN DE CARRERA

Autor:

Sergio Gil Gómez

Tutoras:

Cristina García Cabezón

Yolanda Blanco Val

JULIO 2012



AGRADECIMIENTOS

Llegado el momento de terminar la carrera, es tiempo de echar la vista atrás y pensar en todos los momentos por los que he pasado desde que comencé mis estudios universitarios. A pesar de sentir una gran alegría al ver ya el final, no puedo evitar pensar en los momentos duros por los que he pasado durante todos estos años y las decisiones difíciles que he tenido que tomar, pero sobretodo no dejo de pensar en el apoyo incondicional que he encontrado siempre por parte de mis padres y mi hermana, y en los sacrificios que han hecho por mí. Lo tengo presente y no hay día en que no me sienta afortunado por tenerles a mi lado. Este “éxito” es también suyo. Y por supuesto también lo es del resto de mi familia, de mis primos y tíos, que siempre me han animado a seguir luchando, y de los que no están, que sé que estarían orgullosos de mí.

En segundo lugar querría dar las gracias a Patricia, por estar siempre a mi lado y creer en mí, y hacer que yo creyese en mí mismo.

No querría olvidarme de dar las gracias a todas y cada una de las personas que he conocido durante estos años, y a las que conocía ya, pues juntos hemos compartido alegrías, decepciones y horas de estudio. Con algunos he forjado una amistad para toda la vida, con otros quizás pierda el contacto con el tiempo, pero he aprendido mucho de todos ellos, y de cada uno me llevo algo.

Finalmente me gustaría dar las gracias a mis dos tutoras Cristina y Yolanda, sin cuya ayuda no habría sido posible la realización de este proyecto, así como a todo el personal del Departamento, siempre dispuestos a echar una mano. Su entrega y dedicación han sido fundamentales para poder llegar a este momento. También quiero acordarme de mis compañeros de laboratorio, pues juntos hicimos más amenas nuestras horas de trabajo.

Gracias por todo

Sergio, julio de 2012



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

PROYECTO FIN DE CARRERA



ÍNDICE

1 - INTRODUCCIÓN	11
1.1 - ENUNCIADO DEL PROYECTO.....	13
1.2 - JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.....	13
1.3 - OBJETIVOS.....	14
1.4 - PLAN PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO.....	14
2 - ACEROS INOXIDABLES PULVIMETALÚRGICOS	17
2.1 - PROCESO DE PULVIMETALURGIA.....	19
2.1.1 - INTRODUCCIÓN.....	19
2.1.2 - ETAPAS DEL PROCESO DE PULVIMETALURGIA.....	21
2.1.2.1 - Manufactura de los polvos.....	21
2.1.2.2 - Dosificación y mezcla.....	27
2.1.2.3 - Compactación.....	28
2.1.2.4 - Sinterización.....	34
2.1.2.5 - Mecanizado final.....	34
2.1.3 - PROPIEDADES DE LOS PRODUCTOS SINTERIZADOS.....	36
2.1.4 - PRODUCTOS SINTERIZADOS.....	36
2.1.5 - VENTAJAS E INCONVENIENTES.....	37
2.2 - GENERALIDADES DE LOS ACEROS INOXIDABLES.....	39
2.2.1 - INTRODUCCIÓN.....	39
2.2.2 - CARACTERÍSTICAS DE LOS ACEROS INOXIDABLES PULVIMETALÚRGICOS.....	39
2.3 - FABRICACIÓN DEL POLVO DE ACERO INOXIDABLE.....	43
2.4 - SINTERIZACIÓN DE LOS ACEROS INOXIDABLES PULVIMETALÚRGICOS.....	45
2.5 - APLICACIONES DE LOS ACEROS INOXIDABLES PULVIMETALÚRGICOS: PRÓTESIS.....	47
2.5.1 - APLICACIONES DE LOS ACEROS INOXIDABLES PULVIMETALÚRGICOS.....	47
2.5.2 - ACEROS INOXIDABLES PULVIMETALÚRGICOS PARA LA FABRICACIÓN DE PRÓTESIS.....	48



3 - DESGASTE Y LUBRICACIÓN	51
3.1 - DESGASTE.....	53
3.1.1 - INTRODUCCIÓN.....	53
3.1.2 - CARACTERIZACIÓN DE LOS PROCESOS DE DESGASTE.....	53
3.1.3 - TIPOS DE DESGASTE.....	54
3.1.4 - PREVENCIÓN DEL DESGASTE.....	55
3.1.5 - LOS ACEROS INOXIDABLES PARA APLICACIONES DE DESGASTE.....	56
3.1.6 - MEDIDA DEL DESGASTE.....	57
3.2 - LUBRICACIÓN.....	58
3.2.1 - INTRODUCCIÓN.....	58
3.2.2 - TIPOS DE LUBRICACIÓN.....	59
3.2.3 - LA LUBRICACIÓN EN LA FRICCIÓN Y EL DESGASTE DE LOS ELEMENTOS DE MÁQUINA.....	59
3.2.4 - LOS LUBRICANTES Y SUS CARACTERÍSTICAS.....	61
3.2.4.1 - Lubricantes líquidos.....	61
4 - DESARROLLO DEL PROCESO EXPERIMENTAL	65
4.1 - INTRODUCCIÓN.....	67
4.2 - COMPACTADO Y SINTERIZACIÓN.....	68
4.2.1 - MATERIALES.....	68
4.2.2 - MUESTRAS.....	69
4.2.2.1 - Aceros base.....	69
4.2.2.2 - Mezclas.....	70
4.2.2.3 - Bicapas.....	70
4.3 - PREPARACIÓN DE LA PROBETA PARA SU CARACTERIZACIÓN.....	76
4.4 - ESTUDIO DE POROSIDAD.....	79
4.5 - CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL.....	80
4.5.1 - ATAQUE ELECTROLÍTICO CON ÁCIDO OXÁLICO.....	80



4.5.2 - ATAQUE CON REACTIVO DE VILELLA.....	82
4.5.3 - MICROSCOPIA ÓPTICA.....	82
4.6 - CARACTERIZACIÓN MECÁNICA.....	83
4.6.1 - ENSAYO DE MICRODUREZA.....	83
4.6.1.1 - Descripción del ensayo de microdureza.....	83
4.6.2 - ENSAYO DE MACRODUREZA.....	85
4.6.2.1 - Descripción del ensayo de macrodureza.....	85
4.6.2.2 - Desarrollo del proceso experimental.....	87
4.7 - COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO.....	88
4.7.1 - ENSAYO DE DESGASTE SECO.....	88
4.7.1.1 - Descripción del ensayo.....	91
4.7.1.2 - Fases del ensayo.....	96
4.7.1.3 - Resultados obtenidos.....	97
4.7.2 - ENSAYO DE DESGASTE CON LUBRICACIÓN DISCONTINUA.....	98
4.7.2.1 - Preparación de la disolución de Carboximetilcelulosa.....	98
4.7.2.2 - Descripción del ensayo.....	99
4.7.3 - ENSAYO DE DESGASTE CON LUBRICACIÓN INTERNA.....	100
4.7.3.1 - Preparación de la disolución de Carboximetilcelulosa.....	100
4.7.3.2 - Impregnación en la Epovac.....	100
4.7.3.3 - Ensayo de permeabilidad.....	103
5 - ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	105
5.1 - ESTUDIO DE POROSIDAD.....	107
5.1.1 - POROSIDAD SUPERFICIAL.....	107
5.1.1.1 - Aceros base.....	107
5.1.1.2 - Mezclas.....	109
5.1.1.3 - Bicapas.....	111
5.1.2 - ÁREA DE LOS POROS.....	117



5.1.2.1 - Aceros base.....	117
5.1.2.2 - Mezclas.....	118
5.1.2.3 - Bicapas.....	120
5.2 - CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL: MICROSCOPIA ÓPTICA.....	126
5.1.1 - ACEROS BASE.....	126
5.1.2 - MEZCLAS.....	129
5.1.3 - BICAPAS.....	130
5.3 - CARACTERIZACIÓN MECÁNICA.....	135
5.3.1 – ENSAYO DE MICRODUREZA.....	135
5.3.1.1 - Aceros base.....	135
5.3.1.2 - Mezclas.....	139
5.3.1.3 - Bicapas.....	142
5.3.2 - ENSAYO DE MACRODUREZA.....	150
5.3.2.1 - Aceros base.....	150
5.3.2.2 - Mezclas.....	152
5.3.2.3 - Bicapas.....	154
5.4 - COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO.....	160
5.4.1 - ENSAYO DE DESGASTE SECO.....	160
5.4.1.1 - Aceros base.....	160
5.4.1.2 - Mezclas.....	163
5.4.1.3 - Bicapas.....	166
5.4.2 - ENSAYO DE DESGASTE CON LUBRICACIÓN DISCONTINUA.....	179
5.4.2.1 - Aceros base y Mezclas.....	179
5.4.2.3 - Bicapas.....	183
5.4.3 - ENSAYO DE DESGASTE CON LUBRICACIÓN INTERNA.....	191
5.4.3.1 - Carboximetilcelulosa al 2% - Media hora de vacío.....	191
5.4.3.1.1 - Aceros base y Mezclas.....	191



5.4.3.1.2 - Bicapas.....	203
5.4.3.2 - Carboximetilcelulosa diluida - Alto vacío.....	214
5.4.3.2.1 - Aceros base y Mezclas.....	214
5.4.3.2.2 - Bicapas.....	229
6 - CONCLUSIONES.....	237
7 - ANEXOS.....	241
Anexo 1 - Porosidad superficial y Área de los poros.....	243
Anexo 2 - Caracterización microestructural: Micrografías.....	397
Anexo 3 - Comportamiento tribológico: Ensayo de desgaste seco.....	347
Anexo 4 - Comportamiento tribológico: Ensayo de desgaste con lubricación discontinua.....	361
Anexo 5 - Comportamiento tribológico: Ensayo de desgaste con lubricación interna.....	371
8 - BIBLIOGRAFÍA.....	397
9 - EQUIPOS UTILIZADOS.....	401



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

PROYECTO FIN DE CARRERA



INTRODUCCIÓN



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

PROYECTO FIN DE CARRERA



1 - INTRODUCCIÓN

1.1 - ENUNCIADO DEL PROYECTO

Comportamiento tribológico de materiales porosos para la fabricación de prótesis

1.2 - JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

En los últimos años ha existido un interés creciente por la utilización de materiales porosos de acero inoxidable para la fabricación de elementos de fricción de prótesis médicas. Una de las cuestiones fundamentales, además de la biocompatibilidad y de las cuestiones de resistencia mecánica, es el comportamiento tribológico de las mismas. El análisis a largo plazo de estos elementos indica que la mayoría de los fallos en servicio están relacionados con el desgaste.

Entre los diferentes candidatos para la fabricación de prótesis se encuentran los aceros inoxidables, que cuentan con ventajas económicas y técnicas frente a aleaciones de titanio y cobalto, que aconsejan el estudio de su comportamiento en servicio.

Los componentes pulvimetalúrgicos de aceros inoxidables, contemplados como productos de un gran valor añadido debido a la combinación de propiedades y características que presentan, son especialmente útiles en sectores de potencial desarrollo como la industria química de implantes. En este último campo centraremos el interés del proyecto.

De entre todos los aceros inoxidables pulvimetalúrgicos, los inoxidables austeníticos, ferríticos y dúplex son los que hasta el momento han tenido un desarrollo más amplio para aquellas aplicaciones donde se requiere excelente resistencia al desgaste, resistencia mecánica y biocompatibilidad. La fabricación de este tipo de acero por técnicas convencionales es costosa, mientras que el conformado pulvimetalúrgico, utilizando atmósferas de sinterización ricas en nitrógeno, es una técnica que puede resultar simple y viable económicamente. El nitrógeno en los aceros pulvimetalúrgicos puede mejorar el comportamiento tribológico gracias a su puesta en solución sólida como a la precipitación de fases secundarias, fenómenos que deben ser considerados.

El conformado pulvimetalúrgico convencional nos permite fabricar implantes porosos autolubricados imposibles de obtener mediante otras técnicas de conformado. Además, el conformado de polvos admite mezclas de polvos de diferentes composiciones y diferentes granulometrías, e incluso la utilización de diferentes condiciones de compactado y sinterización para conseguir un grado de porosidad óptimo que garantice un adecuado balance entre las características mecánicas resistentes y las características de permeabilidad para la autolubricación. Igualmente, el conformado pulvimetalúrgico convencional nos permite lograr materiales heterogéneos con diferente grado de porosidad interior y exterior, controlando las condiciones de compactado y sinterización, lo que puede ser altamente beneficioso para conseguir biomateriales destinados a prótesis resistentes al desgaste.



Adicionalmente, el conformado pulvimetalúrgico nos ofrece la posibilidad de obtener fácilmente materiales nuevos resultantes de la combinación de polvos metálicos con propiedades diferentes de los de partida. La estructura óptima para las aplicaciones tribológicas consistiría en una capa superficial caracterizada por una buena permeabilidad y, por tanto, una fácil lubricación y una capa interna con mejores propiedades mecánicas. Ello puede conseguirse a través de materiales bicapa con diferentes grados de porosidad. Para ello se llevará a cabo la fabricación de materiales compuestos bicapa a partir del compactado y sinterización de dos polvos diferentes con objeto de conseguir materiales con propiedades diferentes en cada una de la capas. Entre las diferentes variables que se considerarán para los polvos metálicos utilizados en el trabajo se encuentran: la composición, el método de obtención atomizado por gas, atomizado por agua y el tamaño de grano de las partículas del polvo.

1.3 - OBJETIVOS

El objetivo principal del proyecto es seleccionar el material, la técnica de procesado y las condiciones de tratamiento que nos permitan la optimización del comportamiento tribológico en condiciones de desgaste seco y desgaste con lubricación de aceros inoxidables pulvimetalúrgicos para su aplicación en implantes médicos y, en consecuencia, debemos realizar un adecuado seguimiento de sus propiedades físicas y mecánicas, así como de su comportamiento frente al desgaste. Para ello se trabajará con materiales simples fabricados a partir de polvos convencionales, con mezclas de polvo de composición y/o de tamaño de partícula diferente y con materiales bicapa integrados por dos materiales distintos en diferentes proporciones. Además se trabajará con dos presiones de compactación diferentes con objeto de obtener diferentes grados de porosidad que den lugar a diferentes propiedades y, por tanto, diferente comportamiento y resistencia frente al desgaste seco y lubricado. En todos los casos se sinterizará en atmosfera de nitrógeno con objeto de evaluar el efecto del nitrógeno en la resistencia al desgaste seco y lubricado de los aceros inoxidables pulvimetalúrgicos.



1.4 - PLAN PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO

1ª ETAPA: Definir material de trabajo

En primer lugar habrá que definir los materiales con los que se va a trabajar, así como su composición química y sus condiciones de sinterizado (atmósfera, presión y tiempo de compactación). Trabajaremos con seis tipos de polvos inoxidables: austenítico (tipo 316L) con tres tamaños de partículas diferentes (estándar, intermedio y grueso), y como acero con tamaño de grano convencional además se utilizarán para las mezclas acero inoxidable 316L atomizado por gas, acero ferrítico (tipo 430L) atomizado por agua y acero 431L atomizado por gas. Además se trabajará con aceros dúplex obtenidos a partir de mezclas de aceros austeníticos y ferríticos tipo 50A/50F y mezclas de aceros austeníticos con diferentes tamaños de partícula.

Adicionalmente se fabricarán bicapas formadas por una capa de polvo atomizado por agua y una capa de la mezcla con atomizado por gas, en diferentes proporciones y diferente así como una bicapa formada por dos capas de polvo austenítico con tamaño de grano más grueso.

2ª ETAPA: Diseño y optimizado del proceso de sinterización

Se hace un estudio de todas las variables de influencia en el proceso de conformado y sinterización de probetas de tracción pulvimetalúrgicas. Se acondiciona la matriz y las condiciones de compactado (cantidad de polvo, condiciones de compactación, etc.), se pone a punto el horno de sinterización en presencia de una atmósfera de N_2-H_2 (95%-5%), que será la que se utilice como fuente de enriquecimiento del material en nitrógeno, y se establecerán los parámetros de sinterizado óptimos relativos a velocidad de calentamiento, temperatura y tiempo de sinterización.

3ª ETAPA: Obtención de las probetas

La obtención de las probetas consta de varias etapas: desde el cálculo de las dimensiones y el peso de las probetas, características en verde, mezcla y pesado de los polvos hasta llegar al proceso de compactación en prensa. Para ello distinguimos dos presiones de compactación diferentes de 550MPa y 750MPa.



4ª ETAPA: Preparación de las probetas para los ensayos

Preparación de probetas metalográficas para facilitar su posterior manipulación en los diferentes procesos y ensayos de caracterización a los que estarán sometidas, obtenidas a partir de las probetas pulvimetalúrgicas. Para ello, habrá que cortar pequeños pedazos de las probetas y empastillarlos en caliente en metacrilato.

5ª ETAPA: Procesos y ensayos a realizar en los aceros

De lo que se trata en esta etapa es de estudiar la microestructura y el comportamiento del material en diferentes condiciones de trabajo. Para ello se llevarán a cabo ensayos que nos permitirán obtener los resultados que servirán para ver la influencia de las variables de sinterización y de la composición química frente al desgaste. Para ello se someterán a los materiales a los siguientes procesos:

- Estudio microestructural por microscopía óptica para el estudio de la porosidad y caracterización microestructural de los distintos materiales
- Estudio mecánico
- Ensayos de desgaste seco
- Ensayos de desgaste con lubricación discontinua
- Ensayos de desgaste con autolubricación

En los ensayos de desgaste seco se ha puesto a punto un procedimiento de ensayo utilizando como técnica de ensayo el método de “pin on disk”. Se ha trabajado con dos presiones de compactación, 550 MPa y 750MPa, y dos cargas de ensayo diferentes de 5N y 10N cuando ha sido necesario. Los ensayos de desgaste con lubricación se han realizado en las mismas condiciones tribológicas utilizando carboximetilcelulosa como lubricante, el cual es uno de los lubricantes típicos cuando se quieren simular ambientes fisiológicos. Se han realizado dos tipos de ensayos: unos donde el lubricante se ha introducido en los poros mediante una prensa de vacío y otro donde se ha utilizado lubricación con flujo discontinuo, mezcla de lubricante y aire comprimido durante una secuencia cíclica determinada.

6ª ETAPA: Resultados y conclusiones

Recogida de resultados, análisis de los mismos. Estudio de la influencia de las variables metalúrgicas en estudio. Enunciado de las diferentes conclusiones sacadas del estudio de los resultados obtenidos. De todo lo anteriormente tratado se extraerán las oportunas conclusiones.

Resumen:

COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO DE MATERIALES POROSOS PARA LA FABRICACIÓN DE PRÓTESIS

En los últimos años ha existido un interés creciente por la utilización de materiales porosos de acero inoxidable para la fabricación de elementos de fricción de prótesis médicas. Una de las cuestiones fundamentales, además de la biocompatibilidad y de las cuestiones de resistencia mecánica, es el comportamiento tribológico de las mismas. El análisis a largo plazo de estos elementos indica que la mayoría de los fallos en servicio están relacionados con el desgaste.

Entre los diferentes candidatos para la fabricación de prótesis se encuentran los aceros inoxidables, que cuentan con ventajas económicas y técnicas frente a aleaciones de titanio y cobalto, que aconsejan el estudio de su comportamiento en servicio.

Los componentes pulvimetalúrgicos de aceros inoxidables, contemplados como productos de un gran valor añadido debido a la combinación de propiedades y características que presentan, son especialmente útiles en sectores de potencial desarrollo como la industria química de implantes. En este último campo centraremos el interés del proyecto.

De entre todos los aceros inoxidables pulvimetalúrgicos los inoxidables austeníticos, ferríticos y dúplex son los que hasta el momento han tenido un desarrollo más amplio para aquellas aplicaciones donde se requiere excelente resistencia al desgaste, resistencia mecánica y biocompatibilidad. La fabricación de este tipo de acero por técnicas convencionales es costosa, mientras que el conformado pulvimetalúrgico, utilizando atmósferas de sinterización ricas en nitrógeno, es una técnica que puede resultar simple y viable económicamente. El nitrógeno en los aceros pulvimetalúrgicos puede mejorar el comportamiento tribológico gracias a su puesta en solución sólida como a la precipitación de fases secundarias, fenómenos que deben ser considerados.

El conformado pulvimetalúrgico convencional nos permite fabricar implantes porosos autolubricados imposibles de obtener mediante otras técnicas de conformado. Además, el conformado de polvos admite mezclas de polvos de diferentes composiciones y diferentes granulometrías, e incluso la utilización de diferentes condiciones de compactado y sinterización para conseguir un grado de porosidad óptimo que garantice un adecuado balance entre las características mecánicas resistentes y las características de permeabilidad para la autolubricación. Igualmente, el conformado pulvimetalúrgico convencional nos permite lograr materiales heterogéneos con diferente grado de porosidad interior y exterior, controlando las condiciones de compactado y sinterización, lo que puede ser altamente beneficioso para conseguir biomateriales destinados a prótesis resistentes al desgaste.

Adicionalmente, el conformado pulvimetalúrgico nos ofrece la posibilidad de obtener fácilmente materiales nuevos resultantes de la combinación de polvos metálicos con propiedades diferentes de los de partida. La estructura óptima para las aplicaciones tribológicas consistiría en una capa superficial caracterizada por una buena permeabilidad y,

por tanto, una fácil lubricación y una capa interna con mejores propiedades mecánicas. Ello puede conseguirse a través de materiales bicapa con diferentes grados de porosidad. Para ello se llevará a cabo la fabricación de materiales compuestos bicapa a partir del compactado y sinterización de dos polvos diferentes con objeto de conseguir materiales con propiedades diferentes en cada una de las capas. Entre las diferentes variables que se considerarán para los polvos metálicos utilizados en el trabajo se encuentran: la composición, el método de obtención atomizado por gas, atomizado por agua y el tamaño de grano de las partículas del polvo.

El objetivo principal del proyecto es seleccionar el material, la técnica de procesado y las condiciones de tratamiento que nos permitan la optimización del comportamiento tribológico en condiciones de desgaste seco y desgaste con lubricación de aceros inoxidable pulvimetalúrgicos para su aplicación en implantes médicos y, en consecuencia, debemos realizar un adecuado seguimiento de sus propiedades físicas y mecánicas, así como de su comportamiento frente al desgaste. Para ello se trabajará con materiales simples fabricados a partir de polvos convencionales, con mezclas de polvo de composición y/o de tamaño de partícula diferente y con materiales bicapa integrados por dos materiales distintos en diferentes proporciones. Además se trabajará con dos presiones de compactación diferentes con objeto de obtener diferentes grados de porosidad que den lugar a diferentes propiedades y, por tanto, diferente comportamiento y resistencia frente al desgaste seco y lubricado. En todos los casos se sinterizará en atmósfera de nitrógeno con objeto de evaluar el efecto del nitrógeno en la resistencia al desgaste seco y lubricado de los aceros inoxidables pulvimetalúrgicos.

PLAN PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO

El proyecto se llevará a cabo en una serie de fases claramente diferenciadas que se detallan a continuación

1ª ETAPA: Definir material de trabajo

En primer lugar habrá que definir los materiales con los que se va a trabajar, así como su composición química y sus condiciones de sinterizado (atmósfera, presión y tiempo de compactación). Trabajaremos con seis tipos de polvos inoxidables: austenítico (tipo 316L) con tres tamaños de partículas diferentes (estándar, intermedio y grueso), y como acero con tamaño de grano convencional además se utilizarán para las mezclas acero inoxidable 316L atomizado por gas, acero ferrítico (tipo 430L) atomizado por agua y acero 431L atomizado por gas. Además se trabajará con aceros dúplex obtenidos a partir de mezclas de aceros austeníticos y ferríticos tipo 50A/50F y mezclas de aceros austeníticos con diferentes tamaños de partícula.

Adicionalmente se fabricarán bicapas formadas por una capa de polvo atomizado por agua y una capa de la mezcla con atomizado por gas, en diferentes proporciones y diferente así como una bicapa formada por dos capas de polvo austenítico con tamaño de grano más grueso.

2ª ETAPA: Diseño y optimizado del proceso de sinterización

Se hace un estudio de todas las variables de influencia en el proceso de conformado y sinterización de probetas de tracción pulvimetalúrgicas. Se acondiciona la matriz y las condiciones de compactado (cantidad de polvo, condiciones de compactación, etc.), se pone a punto el horno de sinterización en presencia de una atmósfera de N_2-H_2 (95%-5%), que será la que se utilice como fuente de enriquecimiento del material en nitrógeno, y se establecerán los parámetros de sinterizado óptimos relativos a velocidad de calentamiento, temperatura y tiempo de sinterización.

3ª ETAPA: Obtención de las probetas

La obtención de las probetas consta de varias etapas: desde el cálculo de las dimensiones y el peso de las probetas, características en verde, mezcla y pesado de los polvos hasta llegar al proceso de compactación en prensa. Para ello distinguimos dos presiones de compactación diferentes de 550MPa y 750MPa.

4ª ETAPA: Preparación de las probetas para los ensayos

Preparación de probetas metalográficas para facilitar su posterior manipulación en los diferentes procesos y ensayos de caracterización a los que estarán sometidas, obtenidas a partir de las probetas pulvimetalúrgicas. Para ello, habrá que cortar pequeños pedazos de las probetas y empastillarlos en caliente en metacrilato.

5ª ETAPA: Procesos y ensayos a realizar en los aceros

De lo que se trata en esta etapa es de estudiar la microestructura y el comportamiento del material en diferentes condiciones de trabajo. Para ello se llevarán a cabo ensayos que nos permitirán obtener los resultados que servirán para ver la influencia de las variables de sinterización y de la composición química frente al desgaste. Para ello se someterán a los materiales a los siguientes procesos:

- Estudio microestructural por microscopía óptica para el estudio de la porosidad y caracterización microestructural de los distintos materiales
- Estudio mecánico
- Ensayos de desgaste seco
- Ensayos de desgaste con lubricación discontinua
- Ensayos de desgaste con autolubricación

En los ensayos de desgaste seco se ha puesto a punto un procedimiento de ensayo utilizando como técnica de ensayo el método de "pin on disk". Se ha trabajado con dos presiones de compactación, 550 MPa y 750MPa, y dos cargas de ensayo diferentes de 5N y 10N cuando ha sido necesario. Los ensayos de desgaste con lubricación se han realizado en las mismas condiciones tribológicas utilizando carboximetilcelulosa como lubricante, el cual es uno de los lubricantes típicos cuando se quieren simular ambientes fisiológicos. Se han realizado dos tipos de ensayos: unos donde el lubricante se ha introducido en los poros mediante una prensa de vacío y otro donde se ha utilizado lubricación con flujo discontinuo, mezcla de lubricante y aire comprimido durante una secuencia cíclica determinada.

6ª ETAPA: Resultados y conclusiones

Recogida de resultados, análisis de los mismos. Estudio de la influencia de las variables metalúrgicas en estudio. Enunciado de las diferentes conclusiones sacadas del estudio de los resultados obtenidos. De todo lo anteriormente tratado se extraerán las oportunas conclusiones.

CONCLUSIONES

En base a todo el proceso experimental desarrollado y a los resultados obtenidos, se han podido establecer las siguientes conclusiones:

En cuanto a la porosidad superficial se observa que el factor más relevante es el tamaño de partícula: las muestras con tamaño de partícula más grande son las que presentan mayor porosidad. La presión de compactación es igualmente relevante: cuanto menor es la presión de compactación, mayor es la porosidad superficial. En las mezclas dúplex se obtienen menor porosidad superficial que en los materiales de partida, mientras que las mezclas austeníticas presentan mayor porosidad que los materiales de referencia. En cuanto a las bicapas, se observan ligeras diferencias entre las capas de acero atomizado por agua y las de mezcla con atomizados, por gas pero no son muy significativas y sólo las bicapas con tamaños diferentes de grano dan lugar a elevadas porosidades.

El área de los poros sigue un comportamiento análogo al de la porosidad superficial en el caso de los aceros homogéneos y mezclas. En el caso de las bicapas no existen grandes diferencias, si bien el área de los poros es más elevada en la bicapa que en el material homogéneo cuando se trabaja con presiones de compactación más altas y hay menor cantidad de mezcla en la bicapa. Con respecto a las bicapas obtenidas a partir de mezclas, en el caso de mezclas de composiciones, aceros dúplex, los poros son ligeramente más grandes en la bicapa, mientras que para las mezclas de tamaños diferentes se observa que los poros se reducen de tamaño en las bicapas.

La caracterización microestructural revela que la microestructura de los aceros pulvimetalúrgicos es compleja y el grado de precipitación de nitruros de cromo es altamente dependiente de la composición de los polvos, del método de obtención de los polvos, de la composición de la mezcla, y de las condiciones de obtención de las bicapas.

Las propiedades mecánicas de los diferentes materiales pueden ser evaluadas mediante los ensayos de macro y microdureza. Al respecto, indicar que los ensayos de macrodureza están mucho más influenciados por el grado de porosidad y por tanto se observa que los más porosos son los que presentan menor dureza. La microdureza está menos influenciada por el grado de porosidad y se observa que las mezclas dúplex presentan mayor dureza que los aceros de partida y que en el caso de las bicapas se observa que la mezcla con polvos de acero atomizado por gas origina un cierto endurecimiento.

Son los aceros Dúplex 50/50 los que presentan mejor comportamiento frente al desgaste, siendo el acero austenítico convencional el que presenta mayor penetración. Respecto al efecto de la porosidad y la presión de compactación se observa que las muestras más compactas tienen menores penetraciones siendo esto mucho más evidente para las muestras menos resistentes al desgaste. Respecto a la formación de bicapas, tanto las austeníticas generadas a partir de mezclas con diferentes tamaños de partícula como en bicapas obtenidas con mezclas de polvos atomizados por gas se observa una clara mejora respecto a los materiales de referencia.

La lubricación discontinua con Carboximetilcelulosa tiene un efecto altamente beneficioso en la resistencia al desgaste y a la fricción. La composición dúplex sigue presentando mejor comportamiento que los aceros ferríticos y austeníticos de partida. Los aceros inoxidable austeníticos de tamaño de partícula mayor presentan mejor comportamiento al desgaste que los convencionales. Las bicapas austeníticas con mezclas de polvos de tamaños de partícula suponen una mejora en el comportamiento tribológico respecto a los aceros convencionales, la bicapas con polvos atomizados por gas presentan un comportamiento similar a los aceros de referencia.

La autolubricación interna exige de materiales con alto grado de porosidad y elevado tamaño de poro, esto es, materiales fabricados a partir de polvos con tamaño de partícula superior a las 500 micras. Además de alta permeabilidad es necesario emplear lubricantes con bajo grado de viscosidad y altas condiciones de vacío para conseguir la lubricación interna. Los materiales autolubricados conseguidos en estas condiciones presentan un excepcional comportamiento tribológico.



ACEROS INOXIDABLES PULVIMETALÚRGICOS



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

PROYECTO FIN DE CARRERA



2 - ACEROS INOXIDABLES PULVIMETALÚRGICOS

2.1 - PROCESO DE PULVIMETALURGIA

2.1.1. - INTRODUCCIÓN

La pulvimetalurgia o metalurgia de polvos se define como el conjunto de procesos que nos permiten, partiendo de polvos metálicos, obtener componentes, piezas, elementos con formas y propiedades prefijadas, etc. Es decir, es un proceso en el que se mezclan dosis concretas de polvos metálicos finos, se comprimen para darles una forma definida (compactado) y luego se calientan en una atmósfera controlada (sinterizan), a una temperatura inferior al punto de fusión del componente principal, durante un tiempo suficiente para que se traben las superficies de las partículas en contacto y se establezcan las propiedades buscadas.

Este proceso vulgarmente conocido, en su conjunto, como sinterizado es importante para la fabricación en masa de piezas pequeñas de gran precisión y formas complicadas con desperdicio reducido de material. El proceso admite materiales o mezclas poco comunes y permite lograr grados de porosidad o permeabilidad controlados. Sus campos de aplicación se orientan hacia los casos en que las ventajas económicas son de peso, o bien hacia los que el producto no puede manufacturarse de otro modo.

En la actualidad, los metales están perdiendo peso en muchos campos de la industria en beneficio de nuevos materiales como polímeros, lo que ha dado lugar a que la pulvimetalurgia haya extendido su utilización a estos materiales. La conformación de un producto a partir de este proceso de pulvimetalurgia cubre una amplia gama de materiales, y de componentes o productos como engranajes, ruedas dentadas, levas, cojinetes, herramientas de corte, productos porosos, filtros y componentes de automoción como segmentos de pistones, guías de válvulas, varillas de conexión de pistones y pistones hidráulicos. Los avances actuales en esta tecnología permiten utilizarla también para la construcción de piezas relacionadas con la aeronáutica.

Los metales más utilizados en la metalurgia de polvos son hierro, cobre, aluminio, estaño, níquel, titanio y metales refractarios. Para elementos hechos de latón, bronce, acero y acero inoxidable son utilizados polvos prealeados donde cada partícula de polvo es por sí misma una aleación.

Actualmente la pulvimetalurgia puede competir con procesos de fabricación del tipo de moldeo, la forja en frío y en caliente y el mecanizado, en particular cuando se trata de producir piezas de forma compleja.

Los orígenes de esta tecnología se encuentran en los albores de la humanidad ya que el hombre primitivo fabricaba armas y otros objetos metálicos mediante la forja de partículas metálicas. Hasta las culturas precolombinas, existieron algunas formas toscas de pulvimetalurgia, en Egipto y también la llevada a cabo por los árabes. La fusión de los metales relegó al olvido las técnicas anteriores. Es en los siglos XVIII y XIX cuando la metalurgia de polvos apareció de nuevo e inició su desarrollo hasta el momento actual. El primer metal



trabajado por esta tecnología fue el platino. A partir de 1859 se consiguió la fusión del platino y se inicia un desarrollo de la nueva tecnología siempre dirigida a la obtención de productos que no podían ser logrados mediante el empleo de las tecnologías existentes. Merece especial mención la fabricación de filamentos para lámparas de incandescencia, carburos cementados y materiales porosos como cojinetes autolubricados y filtros. Antes y durante la segunda guerra mundial la pulvimetalurgia tuvo un fuerte desarrollo. La primera fabricación industrial de importancia tuvo lugar en los años veinte, cuando se fabricaron por este proceso, filamentos de herramientas de corte de carburo de wolframio. En los últimos años el proceso ha evolucionado enormemente y la producción anual de productos sinterizados ha alcanzado niveles importantes, así entre 1960 y 1980 el consumo de polvos de hierro se multiplicó por diez. En su mayoría estos productos no pasan de los 5 centímetros pero se han fabricado piezas de hasta 32Kg de peso y de hasta 50 centímetros. Esta evolución se debe en gran medida al desarrollo creciente de la industria del automóvil, que fue desarrollando distintas piezas para máquinas en acero sinterizado utilizando las técnicas básicas de la metalurgia de polvos: compresión en matriz y sinterización, que frente a los procesos convencionales, presentaba como ventajas esenciales las siguientes:

- Ahorro en las materias primas.
- Precisión dimensional.
- Acabado perfecto sin necesidad de mecanizado.

Para fabricar un elemento por pulvimetalurgia hay que tener en cuenta seis consideraciones principales en cuanto al diseño. La elección del proceso a seguir dependerá en gran medida de ellas:

- *Tamaño:* Debido a la naturaleza física del proceso y a la limitación del equipo de fabricación, el tamaño del producto final está condicionado. Cuando la compactación se realiza por inyección de metal, el tamaño es una variable a tener muy en cuenta, mientras que cuando se realiza por presión isostática en caliente, no es trascendente.
- *Forma compleja:* Una de las razones por las que la pulvimetalurgia es elegida como proceso de fabricación para determinadas piezas es por su capacidad para producirlas por su forma compleja. Por tanto la forma final del producto dependerá del método usado para consolidar los polvos.
- *Tolerancias:* El control de las tolerancias dimensionales es una característica que se tiene en cuenta en todos los procesos de producción de polvos y que se convierte en un factor muy importante en pulvimetalurgia. Las tolerancias están determinadas mediante varios parámetros como son las características del polvo, la compactación y el ciclo de sinterizado.
- *Características del polvo:* La forma del polvo, el tamaño y la pureza son factores importantes en la aplicación de una técnica de aplicación del polvo. Generalmente las partículas han de ser de forma esférica y regular, lo cual no quiere decir que para otros procesos sea requerida de una forma más irregular.

- *Propiedades:* La funcionalidad de cualquier producto está determinada por sus propiedades físicas y mecánicas. En pulvimetalurgia estas propiedades están directamente relacionadas con la densidad del producto y las condiciones del proceso.
- *Cantidad y coste:* El que el proceso de producción de un producto mediante un proceso de pulvimetalurgia sea rentable o no está determinado por el número de piezas que sean producidas.

2.1.2 - ETAPAS DEL PROCESO DE PULVUMETALURGIA

La producción de un componente mediante técnicas pulvimetalúrgicas, normalmente abarca las siguientes etapas: manufactura de los polvos; dosificación y mezcla; compactación; sinterización; mecanizado final.

Si es necesario, a estas cinco etapas les puede seguir otras operaciones como tratamientos térmicos para conseguir un determinado comportamiento.

2.1.2.1 - Manufactura de los polvos

Existen distintos métodos de producción de polvo de metal dependiendo de cuál sea la base metálica que se va a emplear. Como ya se ha comentado anteriormente las propiedades de los productos pulvimetalúrgicos dependen mucho de las características de los polvos metálicos que se empleen, y del método de fabricación elegido. De esas características de los polvos, las más importantes son la composición y la pureza, el tamaño de las partículas y su distribución y la forma de las partículas y la textura superficial de estas. Estas características son importantes porque afectan significativamente a la permeabilidad y al movimiento de las partículas durante la compactación, y en consecuencia, a las operaciones de sinterizado.

Se han desarrollado varios procesos para producir polvos metálicos, cada uno de los cuales transmite unas propiedades y características definidas a los polvos y a los productos resultantes.

Estos métodos de fabricación que se han desarrollado, se pueden clasificar en tres grupos:

A - Métodos mecánicos:

El método más importante empleado para la obtención de polvo, consiste en la trituración y molienda de las materias primas. El proceso se realiza triturando y mezclando en un molino de bola de la masa metálica mediante ruptura frágil o menos dúctil durante la trituración.

Cuando se trata de materiales frágiles, las partículas de polvo presentan formas angulares, mientras que los metales dúctiles son fácilmente desmenuzables y no son susceptibles de aplicaciones en metalurgia.



Otro tipo de método de fabricación mecánica de polvos consiste en la misma mezcla de polvos de metales en el molino de bola, bajo el impacto de bolas duras. Los polvos se fracturan y se sueldan unos con otros mediante procesos de difusión formando polvos aleados.

B - Atomización del metal fundido o en estado líquido:

Es el método más generalizado y consiste en la desintegración de un chorro de un metal fundido mediante un fluido (agua o gas), que provoca su rápido enfriamiento atomizándose el metal, que suele requerir un tratamiento térmico posterior. Los fluidos más utilizados para la atomización son el agua, el aire o gases inertes. El agua proporciona partículas irregulares mientras que la atomización gaseosa proporciona polvos esféricos.

El tamaño de las partículas formadas depende de la temperatura del metal, del grado de movimiento, del tamaño de inyector y de las características del surtidor.

Una variante de este método consiste, en incidir con arco eléctrico sobre un electrodo que gira rápidamente dentro de un recinto evacuado y relleno de gas inerte. Este método es particularmente recomendado para obtener polvos prealeados, ya que, empleando un electrodo de aleación, todas las partículas tendrán la misma composición de elementos aleantes. Así pueden obtenerse polvos de acero inoxidable y de aleaciones de base níquel, titanio o cobaltos, así como de algunos aceros de baja aleación. Las principales ventajas de este método son su universalidad, ya que pueden fabricarse tanto polvos de metales puros, como de aleaciones, de la forma anteriormente descrita, su flexibilidad, y el poder de regular a voluntad el tamaño, forma y granulometría de las partículas.

C - Métodos químicos:

Existen varios métodos químicos, entre los que destacan los siguientes:

- **Reducción directa de óxidos:** Es el método más utilizado en la producción de polvos de hierro. Utiliza gases como hidrogeno y monóxido de carbono como agentes reductores. Los polvos producidos mediante este método son esponjosos y porosos y tienen tamaño uniforme bien sea esférico o de forma angular.
- **Deposición electrolítica:** La deposición electrolítica utiliza soluciones acuosas o sales fundidas. Los polvos producidos por este método son los más puros.
- **Descomposición de carbonilos:** El material de partida es chatarra seleccionada, esponjas, etc. Los carbonilos metálicos como el carbonilo de hierro y el de níquel. Los productos de reacción son descompuestos a hierro y a níquel produciendo partículas pequeñas, densas y esféricas de alta pureza.
- **Otros métodos:** Menos utilizado es el método de la precipitación desde una solución química produciendo finos filamentos mediante un mecanizado y condensación de vapor.

Estos métodos, solos o combinados, permiten obtener en forma pulverulenta casi de cualquier metal o aleación. Tras su obtención muchos de estos sufren una operación de secado y quizás un termotratamiento antes de avanzar más en el proceso. A continuación se muestran unas tablas a modo de resumen que nos permiten conocer de manera rápida los métodos de producción de polvos metálicos así como los métodos de producción más adecuados para algunos metales.

MÉTODO	MATERIAL	VENTAJAS	INCONVENIENTES	COSTE RELATIVO
ATOMIZACIÓN	Metal o aleación fundidos.	Es el mejor método para polvos aleados. Aplicable para metales y aleaciones con punto de fusión <math><3000^{\circ}\text{C}</math>.	Amplia gama de tamaños.	Medio-bajo.
REDUCCIÓN GASEOSA DE SÓLIDOS	Óxidos de metales como Cu_2O , NiO , Fe_3O_4 .	Facilidad de control del tamaño de partícula. Buena compresibilidad de polvos.	Requieren el empleo de óxidos de elevada pureza. Solo útil óxidos reducibles.	Bajo.
REDUCCIÓN GASEOSA DE DISOLUCIONES	Disoluciones salinas de metales.	Partículas finas. Pueden emplearse minerales. Purificación durante la Lixiviación.	Aplicable a pocos metales.	Medio.
REDUCCIÓN CON CARBÓN	Mineral o cascarilla de laminación.	Bajo coste. Control del tamaño de partículas.	Requiere materias primas de gran pureza.	Bajo.
ELECTROLÍTICO	Ánodos solubles generalmente de Fe o Cu.	Alta pureza del producto. Fácil control.	Limitado a pocos materiales. Costoso.	Medio.
DESCOMPOSICIÓN DE CARBONILOS	Chatarras seleccionadas, esponja, matas.	Polvos finos.	Limitado a pocos polvos. Coste alto.	Alto.
MOLIENDA	Materiales frágiles como Be, Ni.	Tamaño controlado de polvos.	Limitado de materiales frágiles o fragilizados. Calidades de polvos para usos limitados. Proceso lento.	Medio.



Material y método de producción:

POLVOS DE METAL	ATOMIZACIÓN	REDUCCIÓN	ELECTRO DEPOSICIÓN	TERMO DEPOSICIÓN	CONMINACIÓN	PRECIPITACIÓN POR LÍQUIDO Y GAS
Aluminio	x					
Aleaciones de Aluminio	x					
Berilio	x		x		x	
Cobalto	x					
Cobre	x	x	x			x
Aleaciones de Cobre	x					
Hierro	x	x	x	x	x	
Aleaciones de Hierro	x					
Molibdeno		x				
Níquel		x		x		x
Aleaciones de Níquel	x				x	
Plata	x	x				x
Tantalio		x	x			
Estaño	x					
Titanio	x	x		x		
Tungsteno		x				
Zirconio				x		



CARACTERIZACION DE LOS POLVOS. ENSAYOS Y EVALUACION DE POLVOS METALICOS

El comportamiento de los polvos metálicos durante las diversas operaciones de compactación y sinterización depende de la forma, tamaño y distribución de las partículas, y de la estructura de los polvos. Para ello se han desarrollado diversos ensayos específicos que permiten hacer un control de calidad y validar los polvos para el proceso anterior. Así, una vez obtenidos los polvos es preciso estudiar una serie de características, entre otras la composición, la microestructura, el tamaño y la forma de partículas y granulometría, la densidad aparente, la fluencia, la compresibilidad y la superficie específica. La determinación de todas estas propiedades viene reglada por las correspondientes normas, y nos condicionara el diseño de útiles a emplear y procesos a seguir. Analizaremos a continuación esas características tan importantes para el proceso de pulvimetalurgia.

Composición química:

La composición química influye sobre la compactibilidad (la presencia de óxidos superficiales puede provocar problemas en el utillaje, sobre todo si se trata de óxidos abrasivos como la sílice) y la sinterabilidad del material (las impurezas en los polvos metálicos pueden activar o deprimir la sintonización). En este campo hay dos tipos de ensayos normalizados: el ASTM Standard E159, de pérdida al hidrogeno, que mide el contenido en oxígeno del polvo, y el ASTM Standard E194, de contenido de insolubles en ácido, insolubles como la sílice, alúmina, silicatos insolubles y otros materiales refractarios contenidos en el polvo. Estos dos ensayos se usan como índices de la calidad del polvo.

Morfología y tamaño de las partículas:

Estas dos características puede que sean las más importantes de un polvo de metal, en este ámbito, estando ambas íntimamente relacionadas, ya que es necesario conocer la morfología de las partículas para encontrar el mejor método de medir su tamaño. Para no cometer errores, se debe tener en cuenta que la mayoría de los granos no son esféricos. Los dos parámetros básicos para distinguir los diferentes tipos de partículas son sus dimensiones y su contorno superficial. Las partículas se pueden clasificar, según Hirschhorn en las siguientes categorías:

- *Una dimensión:* Aciculares, irregulares
- *Bidimensionales:* Dendríticas, en escamas
- *Tridimensionales:* Esféricas, redondas, irregulares, porosas, angulares.

Existen numerosos métodos experimentales para medir el tamaño de las partículas como el tamizado, la microscopia (óptica convencional o electrónica), la sedimentación o la medida del área superficial mediante la absorción de un gas o un líquido, entre otros. Cada método es útil dentro de un rango de tamaño determinado. Tanto el tamaño como la forma de las partículas están vinculados a la superficie específica de las partículas. En general, para la compactación y la sinterización interesa la mayor superficie específica posible, siendo lo más interesante el tamaño pequeño y la forma irregular. Según la distribución granulométrica



tenemos estructuras de compactación distintas, propiciando las formas irregulares un mejor contacto en la compactación, obteniéndose una mejor resistencia en verde.

Velocidad de flujo:

Esta característica de los polvos está ligada con el tiempo necesario para llenar la cavidad de la matriz de compactación. Se regula mediante el ensayo normalizado ASTM Standard B312. Esta característica depende de la forma, tamaño y distribución de las partículas, siendo las partículas esféricas obtenidas por atomización las que presentan mayor velocidad de flujo. Puede influir esencialmente en la duración del prensado y, por tanto, en la cadencia de producción.

Densidad aparente:

La densidad aparente mide la aptitud del polvo para llenar el espacio disponible sin aplicación de una presión externa y se define como el peso por unidad de volumen de polvo vertido libremente, expresada en g/cm^3 . Es una de las características más útiles e importantes de un polvo al determinar el volumen real ocupado por una masa de polvo y por lo tanto la profundidad de la cavidad de la matriz, y el largo de la carrera de la prensa necesario para compactar y densificar el polvo. Este ensayo está normalizado según la norma ASTM B212.

Compresibilidad:

Compresibilidad y compactibilidad son términos sinónimos para polvos metálicos. Evalúan la efectividad de la presión aplicada para elevar la densidad del polvo. El ensayo normalizado (ASTM Standard B331) la define como la capacidad de una cierta cantidad de polvo de experimentar densificación bajo la acción de una presión de compactación. Frecuentemente se asocia a la densidad en verde, ya que ensayos específicos a diversas presiones de compactación, permiten obtener diferentes densidades en verde y en consecuencia, construir las curvas de compresibilidad para un material dado. La compresibilidad de un material en polvo se determina a través de la curva de la densidad en verde en función de la presión de compactación.

Sinterabilidad o resistencia en crudo:

La sinterabilidad es la capacidad que tiene un polvo para ser sinterizado en determinadas condiciones de atmósfera y temperatura, es decir, es la respuesta térmica de los polvos. Frecuentemente se mide mediante un parámetro de densificación, definido como:

$$\text{Parámetro de densificación} = 100 \times \frac{D_s - D_o}{D_t - D_o}$$



, donde:

- D_s es la densidad de sinterización
- D_o la densidad en verde
- D_t la densidad teórica.

Este parámetro representa un valor relativo entre el valor de la densidad en verde a una determinada presión y la densidad del material. La sinterabilidad también se estima mediante gráficas temperatura-densidad de sinterización, mediante dilatómetrías diferenciales, o mediante análisis térmicos diferenciales.

2.1.2.2 - Dosificación y mezcla

En la mayoría de los casos, un solo polvo no posee todas las características necesarias para un proceso y producto dados, por lo que se hace necesario mezclar varios tipos de polvo para obtener esas propiedades requeridas.

La mezcla de los polvos, es el segundo paso a dar en el proceso de la pulvimetalurgia, y el llevado a cabo siguiendo las siguientes consideraciones:

Debido a que los polvos manufacturados en diferentes procesos tienen diferentes tamaños y formas, deben ser mezclados para obtener uniformidad. La mezcla ideal es aquella en la que todas las partículas del mismo material están distribuidas de manera uniforme. Se sabe perfectamente que un producto de densidad más alta da por resultado unas propiedades de resistencia mecánica y a la fatiga, superiores. Si bien, teóricamente, la densidad debería ser mayor cuando el tamaño de las partículas no sea uniforme, las partículas más finas tienden a separarse y segregarse durante la manipulación y mezclado. Por ello, numerosos consumidores prefieren utilizar partículas de tamaño uniforme en sus procesos.

Los polvos metálicos y los de otros materiales, deben ser mezclados de tal manera que con esta mezcla se consigan propiedades físicas y mecánicas adecuadas para el producto final. Distribuyendo íntimamente materiales inmiscibles, o bien combinando metales y no metales, tales como carburo de wolframio y cobalto en el caso de elementos de corte, pueden conseguirse productos de materiales especiales.

Los lubricantes deben ser mezclados con los polvos para mejorar sus características de movimiento. El resultado es que se reduce la fricción entre las partículas dentro de las matrices. Son lubricantes comúnmente utilizados, el ácido esteárico o el estearato de zinc en proporciones de 5% en peso. Ciertos polvos pueden jugar un doble papel, como es el caso del grafito, que hace de lubricante en el compactado y de fuente de carbono al alearse con el hierro durante el sinterizado. Los lubricantes, tales como el grafito y el ácido esteárico, mejoran las características de flujo y compresibilidad a expensas de la resistencia en crudo. Los aglutinantes tienen el efecto contrario.



2.1.2.3 - Compactación

Uno de las operaciones más importantes y críticas en el proceso de pulvimetalurgia, es la compactación.

La compactación es la etapa en la que los polvos, ya mezclados, son prensados en matrices que imprimen su forma, usando pistones hidráulicos o mecánicos. Los propósitos de la compactación son obtener la forma y densidades requeridas y hacer que el contacto entre partículas sea lo suficientemente fuerte como para ser procesado más adelante.

El prensado de los polvos es conocido como compactación en verde y a los polvos se les conoce como comprimido en crudo. Los polvos deben tener facilidad de movimiento en el interior de la matriz. El prensado generalmente es llevado a cabo a temperatura ambiente aunque también puede hacerse a elevadas temperaturas.

La densidad en verde de los compactos depende de la presión aplicada. A medida que aumenta la presión de compactación la densidad en verde se aproxima al valor de la densidad teórica de la matriz. Otro factor importante es la distribución por tamaño de las partículas. Si todas las partículas son del mismo tamaño, teóricamente aparecerá porosidad cuando sean prensadas (el 24% en volumen).

Los factores a tener en cuenta a la hora de elegir un método de compactación u otro son:

- Continuidad del proceso
- Densidad final (presión de compactación)
- Direccionalidad de la presión
- Velocidad del flujo del polvo
- Temperatura del polvo y del molde de compactación
- No todos los métodos permiten variar la velocidad de aplicación de la presión durante la compactación.

Técnicas de compactación de polvos

Hay numerosas diferencias entre las diferentes técnicas de compactación, pero la más notoria se observa en la temperatura bajo la cual se realiza la compactación y la discretización del proceso. De acuerdo con esto se puede hablar de compactación por un lado, y de inyección por otro, pudiendo en ambos casos hacer el proceso en frío o en caliente.

Compactación en frío:

La compactación en frío consiste en la densificación de los polvos en una matriz de acero templado o de carburo de wolframio, aplicando una presión a un punzón empleando prensas hidráulicas o excéntricas. Esta compactación puede ser uniaxial, biaxial e isostática.

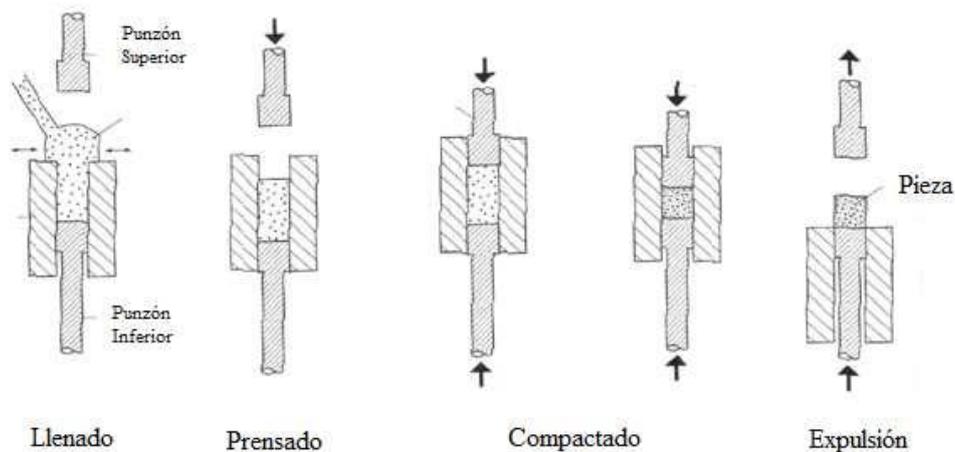
Para reducir la resistencia a la compactación existen lubricantes sólidos especiales que se añaden a la mezcla y reducen la fricción entre las partículas. Si estos lubricantes

contaminasen las partículas de polvo, se deben emplear métodos de compactación alternativos.

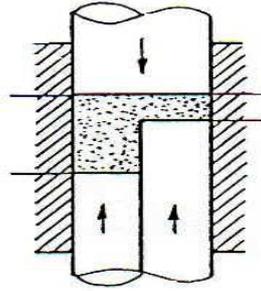
El tamaño y la forma de los polvos, está limitado por la presión necesaria, la capacidad de compresibilidad, la plasticidad y la densidad que se quiere obtener. Algunas limitaciones para muchos productos pulvimetalurgicos son estas que se muestran a continuación:

- Área máxima de compactación de 160 cm².
- Espesor máximo de 75 mm.
- Peso máximo de 2.2 Kg.

En la mayor parte de los casos, el compactado se hace en prensas mecánicas, aunque también se emplean muchas prensas hidráulicas e híbridas (combinadas de mecánica, hidráulica o neumática). Las prensas mecánicas pueden ser de excéntrica, manivela o rotula. Las presiones varían entre 70 y 1000 MPa. En casi todos los casos, el polvo preparado fluye a la matriz por gravedad hasta que rebosa una pequeña cantidad. Este exceso de polvo, se elimina por enrasado, y así el volumen determina la cantidad. La prensa se cierra y comprime el polvo. Otra posibilidad es controlar por pesada la cantidad de polvo, y otra forma, sería dosificarlo preformándolo en tabletas en una maquina especial para ello.



Como las partículas de polvo se desplazan primordialmente en la dirección de la fuerza aplicada y el polvo no fluye como un líquido, cuando la presión se aplica, la densidad máxima se da en la proximidad del pistón y decrece con la distancia a él. Como la densidad es función del espesor, es difícil conseguir productos en los que haya medidas diferentes de espesores. Cuando se busca un espesor no uniforme, se recurre a prensas o procedimientos más complicados. En la figura se ilustra la compactación de una pieza de dos espesores mediante la actuación de émbolos múltiples en la matriz interior.



Otros métodos para lograr un compactado uniforme son la utilización de una prensa hidráulica que aplica una serie de estrujamientos rápidos, de intensidad controladamente creciente, la compactación hidrodinámica, la adición de polvo entre aplicaciones sucesivas de presión con el objetivo de formar un comprimido uniforme, y el uso de lubricante adicional para que la resistencia en crudo no se resienta.

Compactación en caliente:

La compactación en caliente es utilizada cuando se quiere aumentar la resistencia en verde y la densidad en verde de los aceros pulvimetalúrgicos. Cuando se combina con altas temperaturas de sinterizado este proceso produce piezas con muy buenas propiedades mecánicas y a un muy bajo coste.

Debido al aumento de la densidad en verde, las piezas así compactadas, aumentan su maquinabilidad en condiciones en verde. Esta técnica puede ser utilizada para producir piezas aisladas de alta resistencia magnética.

El método de compactación es el más convencional y más utilizado para la producción de materiales utilizados en ingeniería como el hierro, el acero, el acero inoxidable, el latón, el bronce, el cobre y el aluminio. Se utiliza para piezas de tamaño pequeño o mediano como engranajes, ruedas, poleas, levas, aplicaciones de automoción, etc. Tiene propiedades físicas y mecánicas limitadas por la porosidad residual. Tiene amplio rango de aplicaciones, sobre todo cuando es necesaria una buena resistencia.

Forjado de polvos (FP):

En los procesos de forjado de polvos, se utilizan técnicas de procesamiento convencionales y después son tratados en caliente en matrices pequeñas, lo cual hace que el material se deforme lo suficiente como para eliminar la porosidad.

Debido al alto coste de mantenimiento de las herramientas y maquinaria necesaria para producir estos polvos compactados, este método está siendo eliminado.

Moldeo por inyección de metal (MIM):

Este método une las ventajas de la estructura metálica con la posibilidad de realizar piezas de forma compleja mediante el moldeo por inyección. Una mezcla homogénea de polvos y aglutinantes se prepara y se inyecta en un molde. Los polvos son de forma esférica y de un tamaño mucho más pequeño que los utilizados en técnicas convencionales de compactación en frío. Así, una partícula de polvo producida por este método tendrá un diámetro de entre (10-20 μm). Los aglutinantes son elegidos especialmente para proporcionar propiedades reológicas durante la inyección por moldeo, así como para facilitar su propia eliminación después del proceso. Una parte del mismo es eliminada desde el molde mientras que otra se elimina utilizando cualquier disolvente, un proceso térmico o cualquiera ellos. Son procesos más caros que los convencionales y con mejores propiedades físicas y mecánicas por su mayor densidad.

Presión isostática en caliente (HIP):

Debido a su bajo grado de producción, al coste del equipo necesario, y a las herramientas requeridas, este proceso es utilizado para producir aceros para herramientas, superaleaciones, etc. El proceso también requiere una pureza muy alta de los polvos y que sean de forma esférica.

La compactación se produce cuando se somete a los polvos a un vibrado en el interior de contenedores que posteriormente son sellados y a los que se somete a una presión isostática usando un medio gaseoso a alta temperatura.

Esta combinación de calor y presión en el contenedor, proporciona a la pieza en verde la forma final del producto deseado. Por presión isostática en caliente se producen pocos productos, por el coste inherente del proceso, por lo cual su aplicación es de materiales caros. Tiene baja o media producción y tiene una buena maquinabilidad, necesaria para obtener el producto final. La mayoría de los detalles de forma se hacen después del proceso de presión isostática en caliente. Las propiedades físicas y mecánicas son mejores que las de los aceros forjados pero no sinterizados. A continuación se muestra un cuadro resumen en los que se comparan los diferentes métodos de procesado de polvos:

CARACTERÍSTICAS	CONVECCIONAL	MIM	HIP	P/F
TAMAÑO	BUENO	REGULAR	EXCELENTE	BUENO
FORMA	BUENO	EXCELENTE	MUY BUENO	BUENO
DENSIDAD	REGULAR	MUY BUENO	EXCELENTE	EXCELENTE
TOLERANCIAS DIMENSIONALES	EXCELENTE	BUENO	MALO	MUY BUENO
RANGO DE PRODUCCIÓN	EXCELENTE	BUENO	MALO	EXCELENTE
COSTE	EXCELENTE	BUENO	MALO	MUY BUENO

En esta otra tabla se ven las aplicaciones de los métodos de los procesos de polvos:

CARACTERÍSTICAS	CONVECCIONAL	MIM	HIP	P/F
Material	Aceros, Ac. Inoxidables, latón, cobre	Aceros, Ac. Inoxidables	Superaleaciones, Titanio, Ac. Inox.	Aceros
Producción	>5000	>5000	1-1000	>10000
Tamaño (lb)	<5	<1/4	5-5000	<5
Tol. Dimensión.	±0.001in./in.	±0.003in./in.	±0.020in./in.	±0.0015in./in.
Propiedades mecánicas	-80-90% del comercial	-90-95% del comercial	Mayores que el comercial	Igual que el comercial
Precio por peso	0.5 - 5.00\$	1 - 10\$	>100\$	1 - 5\$

Propiedades de los compactos en verde

DENSIDAD EN VERDE Y POROSIDAD: La densidad de la pieza en estado compactado, o densidad en verde, es una propiedad muy útil en metalurgia de polvos. No solo mide la efectividad de la compactación con respecto a la densificación, sino que también determina el comportamiento del material durante la sinterización. En general, la densidad en verde aumenta al aumentar la presión de compactación, (ya que esta favorece el movimiento de partículas, su deformación y fractura) al aumentar el tamaño de las partículas, (ya que favorece el movimiento de las partículas y una mejor distribución de tensiones dentro de la masa de polvos, provocando una mayor deformación) y al disminuir la dureza y resistencia de las partículas, (ya que favorece la deformación) y la velocidad de compactación (ya que favorece el movimiento de partículas). La distribución de la densidad en verde en los distintos puntos de la pieza puede obtenerse a través de técnicas de corte o por medida de dureza de una probeta y las variaciones en la distribución de la densidad en verde de un compacto pueden reducirse o eliminarse mediante el uso de lubricantes que reducen la fricción con las paredes de la matriz, el empleo de altas presiones de compactación, el empleo de bajas relaciones altura/diámetro, el uso de matrices flotantes y compactaciones de doble efecto, y precompactando.

RESISTENCIA EN VERDE: La resistencia en verde de los compactos proviene de la unión mecánica de las irregularidades en las superficies de las partículas, lo que mejora con la deformación plástica. La resistencia en verde crece con la superficie del polvo (lo que equivale a aumentar la irregularidad y disminuir el tamaño de las partículas), con el aumento de la rugosidad superficial de las partículas, y con la densidad en verde (presión de compactación) y al disminuir la densidad aparente (como consecuencia de los dos primeros factores), la contaminación y oxidación superficial de las partículas, y al disminuir la cantidad de algunos aditivos (elementos aleantes como el grafito y el lubricante reducen las uniones mecánicas apropiadas en los polvos de hierro).



DEFECTOS DE LOS COMPACTOS: Los defectos de los compactos en verde pueden disminuir la resistencia en verde, pero lo que es más importante, provocan rechazos de las piezas o de lotes de piezas, después de la sinterización. El principal problema son las grietas, siendo las más típicas las de delaminaciones, que son grietas planas perpendiculares a la dirección de compactación, que no son siempre fáciles de detectar. Las principales causas de la formación de delaminaciones son la recuperación elástica de la pieza, las tensiones inducidas durante la retirada de la carga de compactación o durante la eyección, las presiones de compactación elevadas, variaciones de densidad en verde, exceso de lubricante, y la presencia de gases ocluidos. Los métodos para eliminar o minimizar las delaminaciones son, el empleo de polvos de alta compresibilidad, un buen diseño de la matriz, reducir la presión de compactación si es excesiva, y variar el tipo o la cantidad de lubricante empleado, mejorando la lubricación de las paredes de la matriz. Otro defecto típico es la falta de material que puede venir provocada por una grieta que rompa la pieza o por un mal llenado de la matriz.

DISEÑO: La forma general del componente está determinada por la función que va a realizar, pero es posible incluir diversas variaciones en detalles que no perjudiquen sus prestaciones en servicio. En el diseño de piezas en pulvimetalurgia hay dos consideraciones:

1. El compacto debe poder salir de la matriz sin problemas; así por ejemplo, el compacto no admite más orificios que los paralelos a la dirección de compactación, y si requiere algún rasgo especial debe producirse por un maquinado final.
2. Es necesario evitar partes frágiles en las piezas, como secciones muy delgadas (fuente de grietas, y dan problemas de mal llenado) y ángulos totalmente rectos. También se deben evitar cambios bruscos de sección, y cualquier rasgo peligroso en general.

LUBRICACION: El lubricante tiene como misión reducir la fricción entre el polvo y la pared de la matriz y los punzones, con lo que se pueden emplear mayores presiones de compactación. También reduce la fricción entre el compacto y la pared de la matriz durante la eyección del mismo. Además, el lubricante no debe interferir en el proceso de sinterización. El método más empleado industrialmente es la mezcla de polvos metálicos con el lubricante. Este método es el más sencillo, y además de mejorar la lubricación entre el polvo y la pared, la mejora entre las propias partículas. Sin embargo, tiene el inconveniente de poder provocar grietas si está en exceso, y puede afectar negativamente a las propiedades del polvo tras la lubricación. Los lubricantes más empleados son estearatos, ácido esteárico y ceras.



2.1.2.4 - Sinterización

Durante el sinterizado, los polvos metálicos compactados se enlazan mediante un calentamiento en hornos a una temperatura que es normalmente inferior al punto de fusión del constituyente principal, en su mayoría a temperaturas del 70 al 80% de la fusión del constituyente principal, aunque hay ciertos materiales refractarios que requieran temperaturas cercanas al 90%. Si la temperatura de sinterización está por encima de la de fusión de alguno de los ingredientes, estos componentes se limitaran a fluir por los intersticios de los materiales de punto de fusión más alto.

El sinterizado se produce en una serie de fases que dependen de la temperatura, del tiempo y de la composición de la atmosfera, además del flujo y la direccionalidad de la carga.

Los hornos usados para la sinterización normalmente son similares a los hornos de atmosfera protegida usados en soldadura y en los tratamientos térmicos de los aceros. Sin embargo, la diferencia más significativa entre ambos tipos reside en un cuidado especial al elegir la atmosfera de sinterizado. Los compactos pulvimetalurgicos son porosos, por tanto, hay una gran área superficial expuesta a la atmosfera del horno con lo que las posibilidades de sufrir una oxidación seca son muy grandes, de ahí ese cuidado tan exhaustivo en la elección correcta de la atmosfera. La combinación de gran superficie de exposición y de altas temperaturas produce unos enlaces químicos relativamente fuertes.

A la pulvimetalurgia se recurre muy a menudo para producir piezas de materiales que sean de mecanizado muy difícil. Cuando en piezas de este tipo se desee hacer algún mecanizado, frecuentemente, ello puede facilitarse mediante una operación de presintetizado, en la cual las piezas compactadas se calientan durante un corto periodo a una temperatura considerablemente inferior a la final de sinterización. Esta operación comunica a las piezas una resistencia suficiente para que puedan manipularse y mecanizarse sin dificultad. Luego, reciben el sinterizado definitivo, durante el cual hay poco cambio dimensional. De este modo, el mecanizado posterior al sinterizado puede reducirse a un mínimo o eliminarse por completo.

2.1.2.5 - Mecanizado final

En numerosas ocasiones, las piezas sinterizadas salen del horno listas para su empleo, sin embargo, son muchos los productos que requieren una o más operaciones posteriores, bien sea para acrecentar su precisión o para dotarlos de unas características particulares.

Para restituir la precisión dimensional puede hacerse un segundo prensado, operación conocida como reprensado, matrizado o acunado. La pieza se coloca en una matriz y se somete a una presión igual o mayor que la inicial de prensado. Entonces sobreviene un leve corrimiento plástico, resultando un producto muy uniforme en lo relativo a dimensiones y nitidez de detalles. Además, el acunado puede mejorar la resistencia entre un 25 y un 50%. Es una operación en frio.



Cuando el segundo prensado tenga una deformación masiva del metal, la operación será una forja pulvimetalurgica. En estos casos, el proceso pulvimetalurgico sirve para producir un primordio que está a solo una operación de forja de la forma final. En efecto, las operaciones normales de forja de producir un tocho o lingote, cortarlo, recalentarlo y deformarlo secuencialmente hasta la forma deseada, queda sustituida por la manufactura de un primordio, relativamente sencillo, por sinterización y una operación de forja final que produce una forma más compleja, aumenta la precisión y aporta las ventajas del corrimiento del metal. Esta operación de forja densifica aun más el primordio, a menudo hasta el 99% de la densidad teórica, y mejora significativamente sus propiedades. Si bien hay que hacer uso de atmosferas o cubrimientos para evitar la oxidación en un forjado en caliente, este proceso puede reducir de modo importante la chatarra y los desperdicios y amplia los procesos pulvimetalurgicos mejorando las propiedades y aumentando las posibilidades en cuanto a el tamaño de grano uniforme y pueden hacerse aleaciones o materiales compuestos de aparición reciente.

La permeabilidad de los productos sinterizados producidos con porosidad controlada abre otras dos posibilidades: la impregnación y la infiltración. La primera consiste en obligar a un aceite u otro liquido a penetrar en la red porosa, bien por inmersión de la pieza en un baño y aplicando presión, o combinando depresión y presión. La aplicación mas corriente es la fabricación de cojinetes impregnados de aceite. En este caso, el cojinete en si contiene de un 10 a un 40% de aceite en volumen, que liberara a lo largo de su vida cuando sobre el actúen cargas y en consecuencia, se eleve su temperatura.

Cuando sea indeseable la estructura porosa de una pieza sinterizada, esta puede someterse a infiltración metálica. Aquí, se fuerza entrar al interior del producto, un metal fundido, de menor punto de fusión que el ingrediente principal mediante presión o por capilaridad. Las propiedades tecnológicas resultantes, tales como la resistencia o la tenacidad, son generalmente comparables a las del metal macizo. Por infiltración puede asimismo sellarse poros antes de un tratamiento galvánico, mejorar la maquinabilidad o fabricar componentes estancos a los gases o a los líquidos.

Los productos sinterizados pueden también someterse a operaciones de acabado más convencionales, tales como tratamientos térmicos, superficiales y mecanizados. Si la pieza es de alta densidad o está impregnada de metal, pueden seguirse las técnicas habituales. Pero si es de baja densidad, hay que tomar precauciones especiales. Así, en los tratamientos térmicos, deben emplearse de nuevo atmosferas protectoras y evitarse ciertos líquidos para enfriar rápidamente. En el mecanizado deben afinarse bien las velocidades y avances y cuidar que la pieza no absorba lubricante y evitar los problemas consiguientes. Por otra parte, son aplicables casi todos los métodos de acabado superficial, pero también con ciertas modificaciones en el caso de piezas porosas o de baja densidad.

2.1.3 - PROPIEDADES DE LOS PRODUCTOS SINTERIZADOS

Dado que las propiedades de los productos sinterizados dependen de tantas variables (tipo y tamaño del polvo, cantidad y tipo de lubricante, presión de prensado, temperatura y tiempo de sinterización, tratamientos de acabado, etc.) es difícil exponer una información de validez general. Las propiedades abarcan todos los valores desde los correspondientes a las piezas porosas de baja densidad, con resistencias del orden de solo 70 MPa, hasta los de las piezas de alta densidad y porosidad mínima, con resistencias de 275 a 350 MPa como valores más comunes. En general, las propiedades mecánicas muestran una fuerte dependencia con la densidad, dependencia que las propiedades relacionadas con la fractura, tales como tenacidad, ductilidad y fatiga, exhiben más intensamente que la resistencia y la dureza. Los aleantes se añaden para conseguir polvos de alta resistencia, por lo que las propiedades resultantes tienden a quedar por debajo de las de los productos forjados en cuantías variables, pero habitualmente importantes.

Si para elevar la densidad, se emplean prensas de más capacidad o se hacen operaciones de forja, tanto más tenderán las propiedades mecánicas de los sinterizados a aproximarse a las de los forjados.

La porosidad puede asimismo afectar a las propiedades físicas. Dada la existencia de cavidades y fisuras de oclusión, la resistencia a la corrosión tiende a ser menor. Con la densidad varían también las propiedades eléctricas, térmicas y magnéticas. Como aspecto positivo, la porosidad favorece mucho la amortiguación de sonido y las vibraciones y numerosas piezas sinterizadas se diseñan para aprovechar esas características.

2.1.4 - PRODUCTOS SINTERIZADOS

Los productos comúnmente producidos por pulvimetalurgia pueden clasificarse generalmente, en cuatro grupos:

1. **Productos porosos:** Tales son cojinetes, filtros y reguladores de presión y caudal. Un gran volumen de productos sinterizados lo constituyen cojinetes impregnados de aceite hechos de aleaciones de hierro o cobre. Se aplican extensamente en electrodomésticos y automóviles, ya que no requieren engranarse durante su vida en servicio. Los filtros pueden hacerse con poros de casi todas las medidas, algunos de hasta 0,0025 milímetros.
2. **Productos de formas complicadas:** Requerirían un mecanizado considerable fabricados por otros procedimientos. Por sinterizado se fabrican grandes cantidades de pequeños engranajes. Gracias a la precisión y acabado fino posibles, muchas piezas no necesitan más elaboración y otras solo un leve mecanizado final. Algunos de estos engranajes están impregnados en aceite y, por tanto, son autolubricados. Otras formas complejas, tales como fijadores, levas y pequeñas palancas de disparo, que de ordinario suponen unos costes de mecanizado elevados, es frecuente que puedan obtenerse económicamente por pulvimetalurgia.

3. **Productos de materiales de mecanizado muy difícil:** Una de las primeras aplicaciones modernas de la pulvimetalurgia fue la producción de herramientas de corte de carburo de wolframio. Esta sigue siendo una aplicación importante, a la que se ha incorporado el uso de otros carburos.

4. **Productos que reúnen las propiedades de dos metales o de metales y no metales:** Esta característica singular de los procesos pulvimetalúrgicos se aprovecha en no pocos productos. Así, en la industria eléctrica, se acostumbra a combinar cobre y grafito en componentes tales como escobillas de grupos convertidores, a las que el cobre aporta su aptitud para admitir corrientes de gran intensidad y el grafito la lubricación. Análogamente, se han construido cojinetes de grafito combinado con hierro o cobre, o de mezclas de dos metales, tales como estaño y cobre, en las que un metal más blando se dispersa en una matriz de otro más duro.

En los contactos eléctricos se combinan muchas veces cobre o plata con wolframio, níquel o molibdeno. El cobre o la plata proporcionan una gran conductividad, mientras que el wolframio, níquel o molibdeno proveen de resistencia a la fusión a causa de la elevada temperatura de formación de arco de todos ellos.

2.1.5 - VENTAJAS E INCONVENIENTES

Al igual que la mayoría de los demás procesos de manufactura, la pulvimetalurgia posee algunas ventajas e inconvenientes propios con los que deben familiarizarse los proyectistas para aprovecharlas.

VENTAJAS:

- Gran rapidez de producción: Las etapas del proceso son todas sencillas y pueden lograrse altas cadencias de producción. Las exigencias de mano de obra son reducidas porque el proceso es muy automatizable. La uniformidad y reproducibilidad se cuentan entre las más altas.
- Posibilidad de producir formas complicadas: Aparte de las limitaciones expuestas antes, es posible producir formas muy complicadas, tales como engranajes de combinación, levas y chavetas internas. Muchas veces pueden obtenerse sinterizadas piezas que no pueden mecanizarse ni fundirse económicamente.
- Posibilidad de conseguir una amplia gama de composiciones: Pueden obtenerse sin inconvenientes piezas de una pureza muy alta, o combinarse materiales completamente distintos. Existe la posibilidad de ajustar las composiciones a los pedidos.
- Posibilidad de conseguir una amplia gama de propiedades: La densidad puede variar desde la de los productos de alta porosidad o permeables, hasta la de los de alta densidad, equivalentes a sus homólogos forjados. El amortiguamiento de ruidos y vibraciones puede adaptarse a la medida de cada producto. Es, así mismo posible una amplia variación en la resistencia mecánica.

- Eliminación de la chatarra: La pulvimetalurgia es el único proceso de fabricación ordinario en el que no se desprecia material, mientras que en el moldeo, el mecanizado o la conformación en prensa, la chatarra excede muchas veces del 50 %. Esto es importante cuando intervienen materiales de precio, y a menudo posibilita la utilización de materiales más caros sin incremento del coste global del producto.

INCONVENIENTES:

- Características mecánicas inferiores: En la mayoría de los casos, para un material dado, las piezas sinterizadas carecen de las propiedades físicas de las forjadas o fundidas. Por tanto, hay que limitar su uso cuando intervienen tensiones mecánicas elevadas. No obstante, es frecuente que pueda alcanzarse la resistencia mecánica necesaria recurriendo a materiales diferentes, y habitualmente más caros, o a una segunda elaboración como la forja.
- Costo de matrices relativamente alto: Dado lo elevado de las presiones y la gran abrasión que se da en el proceso, las matrices deben construirse de materiales caros y ser relativamente robustas. Casi nunca será económico producir menos de 10.000 piezas iguales.
- Costo de materiales elevado: Por unidad de peso, los metales en polvo son considerablemente más caros que los laminados o fundidos. Sin embargo, la ausencia de chatarra y la desaparición del mecanizado suelen compensar el costo de la materia prima. Además, como la pulvimetalurgia se aplica habitualmente a la obtención de piezas más bien pequeñas, en la práctica dicho costo no es grande.
- Limitación del diseño: Realmente, la pulvimetalurgia no es adecuada a determinadas formas. Así, las piezas deben presentar una sección uniforme a lo largo de la dirección de compresión, el cociente longitud/diámetro está limitado y más aun el tamaño global que debe adaptarse a la capacidad de las prensas disponibles.
- Disminución de la resistencia a la corrosión: Una de las principales desventajas de los aceros pulvimetalúrgicos frente a los comerciales es la menor resistencia a la corrosión, puesto que se trata de un material poroso y la superficie expuesta será mayor.



2.2 - GENERALIDADES DE LOS ACEROS INOXIDABLES SINTERIZADOS

2.2.1 - INTRODUCCIÓN

Los componentes de acero inoxidable forman un pequeño pero importante segmento del mercado de componentes pulvimetalúrgicos. Para obtener las propiedades físicas y mecánicas y la resistencia a corrosión óptimas, se requiere mayor sofisticación y control que los necesarios en la fabricación de componentes de aceros al carbono o de baja aleación, en particular en el área de la sinterización.

Los aceros inoxidables sinterizados son generalmente empleados en aplicaciones especiales, donde sus propiedades superiores frente a aceros dulces o de baja aleación justifican el aumento de coste.

2.2.2 - CARACTERÍSTICAS DE LOS ACEROS INOXIDABLES PULVIMETALÚRGICOS

Existen muchas razones para elegir los aceros inoxidables en componentes pulvimetalúrgicos; estas razones van desde la apariencia superficial o estética, a las consideraciones técnicas descritas a continuación:

- Resistencia a la corrosión
- Resistencia a la oxidación
- Buenas propiedades mecánicas, ductilidad y resistencia al impacto
- Resistencia a elevada temperatura
- Resistencia al desgaste
- Propiedades amagnéticas (serie 300)
- Propiedades magnéticas (serie 400)
- Tratable térmicamente (serie 400)
- Maquinabilidad (303L)

La resistencia a la corrosión (u oxidación) es a menudo la razón más importante para seleccionar los aceros inoxidables frente a los aceros dulces o de baja aleación. Sin embargo, un proceso de fabricación inadecuado puede reducir de una forma significativa la resistencia a la corrosión y destruir la ventaja de los aceros inoxidables. Las buenas propiedades mecánicas, tanto a temperatura ambiente como a elevada temperatura, al igual que una cierta resistencia al desgaste, son otras razones para elegir estos aceros. Cuando además se requieren materiales no magnéticos, se pueden seleccionar aceros inoxidables austeníticos (serie 300), mientras que si, en cambio, se requieren propiedades magnéticas (en combinación con otras propiedades), se pueden emplear aceros inoxidables ferríticos o martensíticos (serie 400). Los martensíticos pueden también emplearse cuando sea importante una alta resistencia debido a su templabilidad. Si además se requieren mecanizados secundarios, el acero 303L, con presencia de azufre (0,2% nominal), ofrece suficiente maquinabilidad. Así, entre los austeníticos, el 316L ofrece la mejor resistencia a la corrosión combinada con una buena maquinabilidad, mientras que el 304L es más económico, pero presenta peor comportamiento

a la corrosión y maquinabilidad. A continuación se resumen las características de los aceros inoxidables pulvimetalúrgicos:

- **316L** – El mejor acero inoxidable austenítico para componentes pulvimetalúrgicos de utilización general. Buena resistencia a la corrosión y buena maquinabilidad. Amagnético.
- **304L** – Tipo 18-8 básico. El más económico de los aceros inoxidables austeníticos. Resistencia a corrosión y maquinabilidad no tan buena como el 316L. Empleado cuando el ratio de coste de material a coste de proceso es alto.
- **303L** – Austenítico de elevada maquinabilidad. Empleado en componentes que requieran operaciones finales de maquinado fuerte. Resistencia a corrosión inferior a la de los aceros 316L y 304L.
- **410L** – Tipo martensítico básico. Posibilidad de tratamientos térmicos. Puede añadirse carbono para aumentar la dureza y la resistencia al desgaste. Regular resistencia a corrosión.
- **434L** – Tipo ferrítico básico. Mejor resistencia a la corrosión que el 410L. Bajo coeficiente de expansión. Aleación económica.

Los tipos de acero inoxidable fabricados actualmente mediante sinterización para su aplicación como componentes estructurales corresponden, en general, a los tipos fabricados mediante otras tecnologías en lo que se refiere a composición química, aunque no cubren todas las variedades ofrecidas por las técnicas convencionales. Las propiedades de los polvos típicos de diversos tipos de acero inoxidable se muestran en las tablas que hay a continuación, en las que aparecen reflejados tanto la composición, como la granulometría, la densidad aparente y la velocidad de flujo.

Acero	Composición (%)										
	Cr	Ni	Si	Mo	Cu	Sn	Mn	C	S	P	O ₂ (ppm)
Austeníticos											
303	17-18	12-13	0.6-0.8				0.3 (a)	0.03 (a)	0.1-.03	0.03 (a)	
304L	18-19	10-12	0.7-0.9				0.3 (a)	0.03 (a)	0.03 (a)	0.03 (a)	1000-2000
304LSC	18-20	10-12	0.8-1.0		2 (b)	1 (b)	0.3 (a)	0.03 (a)	0.03 (a)	0.03 (a)	
316L	16.5-17.5	13-14	0.7-0.9	2-2.5			0.3 (a)	0.03 (a)	0.03 (a)	0.03 (a)	1000-2000
Martensíticos											
410L	12.13		0.7-0.9				0.1-0.5	0.05 (a)	0.03 (a)	0.03 (a)	1500-2000
Ferríticos											
430L							0.3 (a)	0.03 (a)	0.03 (a)	0.03 (a)	
434L	16-18		0.7-0.9	0.5-1.5			0.3 (a)	0.03 (a)	0.03 (a)	0.03 (a)	

(a) Máximo

(b) Típico

Acero	Distribución granulométrica (#)					Densidad aparente (g/cm ³)	Velocidad flujo (s/50g)
	+100	100-150	150-200	200-325	-325		
Austeníticos							
303	1	7	13	24	55	3.0-3.2	24-28
304L	1	12	20	25	42	2.5-2.8	28-32
316L	1	11	18	26	44	2.6-3.0	24-32
Martensíticos							
410L	1	14	20	26	39	2.6-2.9	26-30
Ferríticos							
434L	1	11	17	27	44	2.5-2.9	26-32

Estos polvos se emplean directamente tras su atomización, aunque los martensíticos pueden ser recocidos para mejorar su densidad en verde y su compresibilidad. La forma de las partículas y otras características del polvo son controladas para producir polvos de densidad aparente entre 2.5 y 3.2 g/cm³, adecuada densidad en verde y buena compresibilidad.

Como se indicó anteriormente, los componentes pulvimetalúrgicos de acero inoxidable se emplean generalmente en aquellos lugares en que sus propiedades superiores justifiquen el mayor coste. Un resumen de las aplicaciones más usuales de los aceros inoxidables en metalurgia de polvos se muestra a continuación:

Componente	Aleación
Aeroespacial	
Bandejas deslizadoras de asientos	316L
Impulsores de combustible	316L
Generadores de espuma	316L
Agricultura	
Equipos nebulizadores de fungicida	316L
Electrodomésticos	
Lavavajillas automáticos	304L
Lavadoras automáticas	304L
Equipos de evacuación de basuras	410L
Asas de cacerolas	316L
Filtros de café	316L-Si
Cuchillos eléctricos	316L
Mezcladores	303L
Abrelatas	410L
Automóvil	
Espejos retrovisores	316L, 434L
Componentes de frenos	434L
Cierres de cinturones de seguridad	304L
Piñones de limpiaparabrisas	410L
Brazos de limpiaparabrisas	316L
Válvulas de control de temperatura	304L



Componente	Aleación
<i>Construcción</i>	
Accesorios y fontanería	303L
Separadores y arandelas	316L
Boquillas de sistemas de regadío	316L
Rociadores	316L
Ferretería de ventanas	304L, 316L
Termostatos	410L
<i>Química</i>	
Filtros	304L-Si, 316L
Juntas de tubos	316L-Si
<i>Eléctrica y electrónica</i>	
Limitadores	410L
Collares de estator de motor	303L
Conjuntor rotatorio	316L
Embragues magnéticos	410L
Mordazas sujetaprobetas	316L
<i>Ferretería</i>	
Componentes de cierres	304L, 316L
Pasadores roscados	303L
Pasadores	316L
Palancas de desconexión	303L, 316L
<i>Industria</i>	
Aparatos de medida de agua y gas	316L
Filtros de líquido y gas	316L-Si
Medidores de combustible	303L
Aparatos de medida de flujo de combustible	410L
Bridas de tubos	316L
Filtros de polímeros	316L-Si
<i>Joyería</i>	
Monedas, medallas, medallones	316L
Esferas de reloj	316L
Correas de reloj	316L
<i>Náutica</i>	
Terminales de empuje de las hélices	316L
Árbol de levas	304L
<i>Medicina</i>	
Equipamiento dental	316L
Audífonos	316L
Vaporizadores de anestesia	316L
<i>Oficina</i>	
Finales de tarjetas perforadas no magnéticas	316L
Interruptores de dictáfonos	316L
Ordenadores	316L
<i>Tiempo libre</i>	
Guías de cañas de pesca	304L, 316L
Engranajes de cañas de pesca	316L
Equipamiento fotográfico	316L
Máquinas expendedoras de bebidas	316L
Bombas de agua en caravanas	316L

2.3 - FABRICACIÓN DEL POLVO DE ACERO INOXIDABLE

Los primeros esfuerzos para fabricar componentes pulvimetalúrgicos de acero inoxidable datan de los años treinta en la “Hardy Metallurgical Company”. Su acercamiento consistió en mezclar polvo elemental de hierro, cromo y níquel en la proporción de un acero 18-8 estándar, compactando la mezcla y sinterizando en hidrógeno seco purificado. Así obtuvieron una estructura austenítica totalmente aleada, y las piezas exhibieron buenas propiedades mecánicas, pero sólo tras sinterizar a 1300° C durante 44 horas.

En 1942, J. Wulff produjo piezas de acero inoxidable a partir de un polvo prealeado en el cual cada partícula tenía la composición 18-8. El polvo fue preparado calentando chatarra de acero inoxidable de alto carbono a 500-750° C para provocar la precipitación de carburos en borde de grano y someter entonces la chatarra sensibilizada a ebullición en una solución $\text{CuSO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ para provocar su desintegración. Polvo de este tipo fue fabricado y comercializado por la “Unexcelled Manufacturing Company” en Nueva York. Este polvo era difícil de comprimir y tenía baja resistencia en verde, pero si se manejaba adecuadamente, proporcionaba propiedades aceptables. Algunos componentes de acero inoxidable, principalmente filtros, fueron desarrollados empleando este polvo.

A finales de los años cincuenta, la “Vanadium Alloys Steel Company” inició la producción de polvo prealeado de acero inoxidable empleando un desintegrador rotativo modificado. Debido a los problemas que acarrea la producción del polvo por este método (molienda en láminas de acero inoxidable sensibilizadas y fragilizadas), desarrollaron una técnica de atomización en agua para fabricar el polvo prealeado de acero inoxidable, y pusieron en marcha una planta que producía de 36 toneladas al año mediante atomización, y que supuso el comienzo de la metalurgia de polvos comercial de los aceros inoxidables.

Así, la atomización en agua se convirtió en 1950 en el proceso utilizado para la fabricación de polvos de acero inoxidable para compactación en matriz y sinterización convencionales. Con el paso de los años, pequeñas modificaciones en las compactaciones típicas del acero convencional mejoraron las propiedades de compactación. Más recientemente, mayores modificaciones en la composición combinada con otras precauciones en el proceso han llevado a mejoras en la resistencia a la corrosión.

En los procesos de atomización, el caldo de acero inoxidable se prepara habitualmente a base de chatarra, empleándose también hierro puro, níquel (en forma de cátodos, pellets o electrolítico) y cromo y molibdeno (añadidos como ferroaleaciones), siendo de gran importancia el control de la composición para asegurar una atomización eficiente y obtener las propiedades deseadas en el polvo fabricado. La fusión de las materias primas se lleva a cabo en hornos de inducción (tanto en vacío como en atmósfera controlada). Cuando la temperatura del metal alcanza los 1650° C se retira la escoria protectora y el metal se vierte en el tundish, donde un orificio de 6-12 milímetros de diámetro permite el flujo de una delgada corriente de metal fundido a la cámara de atomización. El fluido más empleado en la atomización del acero inoxidable es el agua, aunque también se emplean gases. Las gotas fundidas atomizadas de acero inoxidable caen libremente al fondo de la cámara de atomización, que está rellena de agua. La mayoría de las gotas han solidificado durante la



atomización o durante la caída al fondo de la cámara de atomización. Las partículas restantes solidifican al entrar en contacto con el agua. Periódicamente, la pulpa de partículas metálicas y agua es retirada y el agua es separada del polvo mediante centrifugación, filtración o calentamiento. Después de ser secado, el polvo es cribado para eliminar las partículas más grandes y obtener el polvo comercial. En el caso de los aceros inoxidable austeníticos no se requieren más tratamientos, pero el polvo de los martensíticos debe ser recocido para la utilización pulvimetalúrgica. Las bajas concentraciones de manganeso (<0.3%) y la desoxidación con ferrosilicio para conseguir un porcentaje en silicio en la aleación de 0.7-1.0% previene una oxidación excesiva del polvo durante la atomización con agua en la cámara de atomización, que es purgada con un gas inerte (nitrógeno). Las presiones de agua usuales son de aproximadamente 14 MPa, para producir polvo con la distribución granulométrica y la forma de partícula deseadas. Cuanto mayor sea la presión, menores serán los tamaños máximo y medio de partícula. Los polvos empleados comercialmente son atomizados bajo condiciones que produzcan polvo menor de 150 μm (100#), y con un 35 a 50% del polvo menor de 44 μm (325#). La tabla que se expone a continuación muestra la distribución granulométrica para varias condiciones de atomización:

Efecto de la presión del agua en la distribución granulométrica del acero inoxidable atomizado

Presión de agua de atomización (MPa)	Porcentaje menor de 100# (150 μm)	Distribución granulométrica del material menor de 100#		
		100-200# (150-75 μm)	200-325# (74-44 μm)	-325# (<44 μm)
5.5	50	50	30	20
6.9	60	40	35	25
8.3	70	35	35	30
10.3	80	30	30	40
12.1	85	25	30	45
13.8	90	15	25	60

Por otro lado, la forma de las partículas es función del medio y de las condiciones de atomización; así, la atomización en agua producirá polvo de forma más irregular, mientras que en gas inerte o vapor se producirán partículas más redondeadas.

2.4 - SINTERIZACIÓN DE LOS ACEROS INOXIDABLES PULVIMETALÚRGICOS

La sinterización es el paso más crítico en la fabricación de componentes pulvimetalúrgicos de acero inoxidable, debido a la fuerte influencia que tiene sobre la resistencia a la corrosión del material. Durante este tratamiento, el lubricante debe ser eliminado, y las partículas deben unirse entre sí. Es bien conocido que la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables sinterizados es inferior a la de sus equivalentes obtenidos mediante técnicas convencionales. En los aceros inoxidables convencionales la buena resistencia a la corrosión se atribuye a la presencia de capas oxidadas protectoras en la superficie, dependiendo la protección de factores tales como la composición de la película, la insolubilidad, la adherencia, defectos estructurales, etc.

Los aceros inoxidables sinterizados pueden tener numerosa porosidad interconectada que disminuye la resistencia a la corrosión, debido a que la superficie expuesta será mayor. Aún más, aceros de la misma composición nominal y con similares densidad y tamaño y forma de los poros, pueden presentar grandes diferencias en la resistencia a la corrosión; variaciones en los parámetros del proceso de fabricación conducen a calidades diferentes del material para una misma materia prima, ofreciendo diferentes combinaciones de las propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión.

Otro factor que afecta considerablemente al comportamiento frente a la corrosión de estos materiales es el proceso de acabado superficial aplicado. Así, entre las posibles causas que afectan a la resistencia frente a la corrosión de los aceros inoxidables sinterizados se encuentran la mayor área superficial (debido a la porosidad), la presencia de ciertos elementos aleantes (como el silicio, que se emplea para favorecer la atomización), la formación de fase sigma durante la sinterización y el efecto de la atmósfera.

Por último, la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables está comprometida con el nitrógeno, el oxígeno y el carbono, cuando el contenido en cromo de la matriz se reduce debido a la formación de precipitados de dichos elementos. Todo ello ha provocado que se investiguen las complejas relaciones existentes entre los parámetros de sinterización y las propiedades físicas y químicas del componente sinterizado.

La calidad de la materia prima y los parámetros de operación de compactación y sinterización tienen una gran influencia en las propiedades mecánicas y en la resistencia frente a la corrosión de los aceros inoxidables pulvimetalúrgicos. Los efectos son cualitativamente paralelos para cualquier tipo de acero inoxidable, aunque la magnitud de su efecto puede diferir según el material en cuestión. Los parámetros más influyentes son los siguientes:

- *Contenido de nitrógeno, carbono y oxígeno* – A menor cantidad, mayor resistencia frente a la corrosión. Los dos primeros reducen la resistencia frente a la corrosión intergranular, y el tercero frente a la corrosión generalizada.
- *Impurezas* – La presencia de hierro libre (contaminación del polvo) en los componentes aumenta los focos de corrosión.



- *Residuos de lubricante de compactación* – Cuanto mayores sean (debido a una eliminación inadecuada del mismo), menor será la resistencia frente a la corrosión.
- *Densidad de sinterización* – Cuanto mayor sea, mejores propiedades mecánicas.
- *Tiempo y temperatura de sinterización* – Cuanto más elevadas sean, mejores serán las propiedades mecánicas y la resistencia frente a la corrosión, siendo la temperatura recomendada entre 1200 y 1250° C, ya que se reduce la absorción de nitrógeno y el efecto del hierro libre.
- *Punto de rocío de la atmósfera de sinterización* – Cuanto más elevado sea, menor será la resistencia frente a la corrosión debido al empobrecimiento en cromo de la matriz por la formación de óxidos de cromo.
- *Tipo de atmósfera de sinterización* – La presencia de nitrógeno aumenta la resistencia a la tracción y el límite elástico, y disminuye el alargamiento; sin embargo, las atmósferas de hidrógeno y vacío producen la máxima resistencia frente a la corrosión y elevan el alargamiento, pero disminuyen la resistencia a la tracción.
- *Velocidad de enfriamiento en la sinterización* – A mayor velocidad, mejor resistencia frente a la corrosión en los aceros inoxidable austeníticos, debido a la menor precipitación de carburos y nitruros y a la minimización de la reoxidación.



2.5 - APLICACIONES DE LOS ACEROS INOXIDABLES PULVIMETALÚRGICOS: PRÓTESIS

2.5.1 - APLICACIONES DE LOS ACEROS INOXIDABLES PULVIMETALÚRGICOS

Las principales aplicaciones de los aceros inoxidable pulvimetalúrgicos se encuentran en la industria petroquímica, alimentaria, automovilística, nuclear, en equipos para medicina (especialmente en prótesis, de gran interés en este proyecto), en filtros para el control de la polución del aire, etc. Además, se están estudiando nuevas formas para lograr mejores propiedades tanto mecánicas como de resistencia frente a la corrosión, ya sea mejorando su composición química, incluyendo aleantes como estaño, cobre, níquel, carbono, molibdeno y silicio, mejorando los procesos de presinterización y sinterización modificándoles la superficie externa mediante recubrimientos o tratamientos superficiales, así como otros tipos de procesos mecánicos. Por ello, los pronósticos de aplicación de la pulvimetalurgia de aceros inoxidable se presentan de una forma muy favorable.

La decisión de usar aceros inoxidable obtenidos por pulvimetalurgia se basa en dos consideraciones: la forma de la pieza debe ser tal, que se pueda realizar mediante un proceso de pulvimetalurgia, y el uso de aceros inoxidable debe ofrecer muchas ventajas sobre otros materiales.

A continuación se indican algunas de las causas por las que la utilización de aceros inoxidable pulvimetalúrgicos puede ser ventajosa:

- Se obtienen buenas tolerancias y acabados.
- Se pueden hacer forma de la pieza difíciles de obtener por otros medios.
- Existe la posibilidad de obtener porosidades controladas, caso de filtros o de elementos que se deseen impregnar un determinado elemento o fluido.
- Relación masa/volumen controlada.
- Se eliminan posibles ensamblajes.
- Se eliminan las pérdidas de material.
- Producciones elevadas.
- Son económicos.
- Se pueden obtener fácilmente productos de grano fino.
- Productos libres de segregaciones
- Posibilidad de alear materiales a diferentes composiciones.



2.5.2 - ACEROS INOXIDABLES PULVIMETALÚRGICOS PARA LA FABRICACIÓN DE PRÓTESIS:

Los materiales metálicos presentan buenas propiedades mecánicas, como la resistencia y la tenacidad, respecto a otros materiales como los polímeros y los cerámicos. Esto hace que sean los materiales más adecuados para ciertas aplicaciones estructurales, como las prótesis articulares, placas de osteosíntesis, tornillos de fijación o implantes dentales, entre otras.

No todos los materiales metálicos son aceptados biológicamente por parte de los tejidos que están en contacto con ellos, y los estudios de biocompatibilidad son fundamentales para la selección de los que se pueden utilizar como biomateriales. Por otra parte, los materiales metálicos implantables deben presentar una buena resistencia frente a la corrosión, ya que si se produce la oxidación del metal por el ambiente hostil del cuerpo humano, además de que el implante se debilita, se produce una liberación de productos de corrosión a los tejidos circundantes que producen efectos no deseables.

Hay varios metales y aleaciones que cumplen los requisitos anteriormente citados, pero en este proyecto se ha tratado de estudiar la utilidad de los aceros inoxidable pulvimetalúrgicos, por lo que se va a incidir en estos últimos, ya que, además, son frecuentemente utilizados.

El acero inoxidable forjado es el más ampliamente utilizado como aleación para implantes. La microestructura que presenta es austenítica. El contenido total de níquel y cromo es de al menos un 23%. El cromo forma el óxido que protege al resto del acero de la corrosión y el níquel es el elemento que le da tenacidad. Se pueden trabajar fácilmente en caliente o en frío y no se endurecen por tratamiento térmico.

El acero inoxidable 316L (16-18% Cr, 10-14% Ni y 2-3% Mo) es el resultado de reducir el contenido en carbono del acero inoxidable 316 de 0.08% al 0.03% para obtener mejor resistencia a la corrosión. Su aplicación está muy extendida, además de para prótesis de cadera, en aplicaciones de uso temporal, tales como placas de osteosíntesis, tornillos, clavos y fijadores, entre los más importantes.

Los aceros, desnudos o recubiertos, fueron empleados desde inicios del siglo XX con propósitos quirúrgicos. En particular, los aceros inoxidables, desde el descubrimiento adjudicado al científico francés Berthier en 1821 de la mejora de la resistencia a la corrosión que podía conseguirse mediante la adición de cromo al hierro, o desde sus primeras producciones industriales, hacia 1912, se encuentra aplicación en la cirugía ortopédica hacia 1926 (acero tipo AISI 302), e inclusive el tipo utilizado actualmente, AISI 316, sólo comienza a utilizarse generalizadamente a finales de la Segunda Guerra Mundial.

El acero inoxidable tipo AISI 316L es usado mayoritariamente en aplicaciones temporales, aunque también un pequeño porcentaje de implantes permanentes se fabriquen con este material.



La resistencia a la corrosión del acero 316L en fluidos corporales es menor que la de otros materiales, pero resulta suficientemente adecuada para algunos propósitos. Sus propiedades mecánicas, por otra parte, son satisfactorias en la condición de trabajado en frío.

El acero 316L utilizado en implantes tiene una microestructura austenítica (red cúbica centrada en las caras) debido a la presencia de cantidades suficientes de níquel en la aleación, como elementos que regulan la transformación a estructura ferrítica (red cúbica centrada en el cuerpo) que promueve el cromo, elemento clave en la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables.

La estructura austenítica, el bajo contenido en carbono y la presencia de níquel y molibdeno en el acero 316L mejoran la biocompatibilidad del material, en base a los siguientes conceptos:

- Los aceros austeníticos no son ferromagnéticos, con lo cual su implantación en el cuerpo humano no impide la utilización de técnicas de análisis y diagnóstico tales como la generación de imágenes por resonancia magnética, ni deja a las prótesis expuestas a dislocamientos y distorsiones por efecto de campos magnéticos que actúen sobre el paciente.
- La ausencia de la fase ferrítica, que en caso de estar presente le daría carácter magnético al material, mejora la resistencia a la corrosión del implante, ya que dicha fase metalúrgica es mucho más susceptible al ataque corrosivo.
- La presencia de níquel, estabilizador de la austenita, previene la formación de fases martensíticas (fase de alta durezza, de no equilibrio, con morfología acicular) por tratamientos térmicos del material. Los aceros martensíticos presentan características mecánicas desfavorables y baja resistencia a la corrosión. Estos factores los hacen apropiados para su empleo en aplicaciones quirúrgicas.
- Las aleaciones inoxidables que tienen un contenido en carbono superior al 0.03%, tienen a segregar, por exposición durante un tiempo dado a un rango de temperaturas de entre 500 y 900 °C, una fase de carburos de cromo localizada en los bordes de los granos metálicos. Esta condición resulta totalmente factible durante alguna etapa de la producción del metal o de tratamiento térmico durante la fabricación del implante. De esta manera, el cromo es extraído de la zona aledaña al borde de grano metálico. Por lo tanto, al variar la composición del borde de grano respecto de la media, la zona afectada pierde su resistencia a la corrosión, haciéndose proclive a una forma específica de ataque, llamada corrosión intergranular.
- El molibdeno, agregado en proporciones del 2 a 3%, refuerza la capa superficial en medios salinos y acidificados, incrementando además la resistencia a las picaduras. Sin embargo, no debe superarse el 3%, ya que esta modificación en la aleación puede resultar en la formación de islas de ferrita indeseables en la matriz metálica.



La resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables puede ser mejorada, además mediante distintas técnicas:

- El electropulido provee una superficie uniforme, elimina defectos superficiales que pueden servir como puntos de incubación de picaduras del metal, y deja como resultado final una capa superficial homogénea e integral.
- Alternativamente, se puede promover el desarrollo de una capa protectora adecuada mediante, por ejemplo, inmersión de la pieza en una solución de ácido nítrico con una concentración entre el 20 y el 40%, a una temperatura de 60 °C, por un lapso del orden de media hora.



DESGASTE Y LUBRICACIÓN



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

PROYECTO FIN DE CARRERA



3 - DESGASTE Y LUBRICACIÓN

3.1 - DESGASTE

3.1.1 - INTRODUCCIÓN

El desgaste se puede definir como un proceso de pérdida o eliminación de un material que se produce cuando dos superficies sólidas tienen un movimiento relativo entre ellas de deslizamiento o rodadura. El desgaste conduce a un cambio de propiedades y a una pérdida de elementos del sistema.

El desgaste es una de las principales causas de pérdida de material, y cualquier reducción del desgaste puede provocar ahorros considerables de gran importancia económica y de conservación de energía y materiales. La fricción es una causa de disipación de energía, y ambas (desgaste y fricción) pueden controlarse y mejorarse por medio de la lubricación. Por lo tanto, la tribología (ciencia y tecnología de la fricción, lubricación y desgaste) juega un papel muy importante en la conservación de las materias primas y de la energía.

3.1.2 - CARACTERIZACIÓN DE LOS PROCESOS DE DESGASTE

Dada la gran complejidad de los procesos de desgaste, es difícil describir de forma sistemática los diferentes procesos de desgaste que se producen en un sistema tribomecánico. Actualmente se considera que para caracterizar un proceso de desgaste deben tenerse en cuenta los siguientes factores:

- Tipo de movimiento relativo
- Elementos de interacción
- Mecanismo de desgaste dominante
- Entradas al sistema (tipo de carga, coeficiente de fricción, etc.)
- Propiedades del material
- Velocidad de desgaste
- Apariencia de las superficies desgastadas

De los parámetros indicados, los tres primeros son fundamentales, ya que especifican el tipo de desgaste; el resto de parámetros se precisan para una caracterización más compleja y detallada.

Así, en un sistema tribológico se pueden observar cuatro tipos básicos de movimiento relativo (deslizamiento, rodadura, impacto y oscilación), y los mecanismos de desgaste se pueden encuadrar en cuatro grandes grupos (fatiga, abrasión, adhesión y tribo-químicos). No obstante, en la práctica es difícil determinar cuál es el mecanismo de desgaste que actúa; una manera de poder diferenciar los grandes mecanismos es analizar la morfología de las superficies desgastadas.



Sin embargo, hay que resaltar que en muchas ocasiones, los diferentes mecanismos de desgaste no actúan de forma independiente, sino en conjunto. Esto ocurre, por ejemplo, al tenerse condiciones de deslizamiento y rodadura simultáneamente.

Por otro lado, la conducta frente al desgaste de los materiales es muy dependiente de la topografía, la composición química, la estructura física y las propiedades mecánicas de la superficie del material.

3.1.3 - TIPOS DE DESGASTE

Se van a diferenciar cuatro tipos fundamentales de desgaste: por fatiga superficial, por abrasión, por adhesión y tribo-químico o por corrosión.

Desgaste por fatiga superficial:

En la práctica, la mayoría de los mecanismos implican variaciones periódicas de tensiones (por ejemplo, debido al paso de las asperezas durante la rotación) que pueden provocar en deslizamiento o rodadura un fallo en servicio por rodadura. Como la fatiga está únicamente causada por tensiones, cabe resaltar en primer lugar que los efectos de fatiga superficial pueden aparecer sin contacto directo de las superficies implicadas, como ocurre en el caso de la lubricación.

Los efectos de los mecanismos de desgaste por fatiga están asociados al deslizamiento y a la rodadura, siendo de gran interés conocer en estos casos la distribución de tensiones (tangenciales y de cizalladura) en la pieza para este tipo de movimientos. Asimismo, en la distribución de tensiones influyen además los defectos del material y sus características superficiales.

Este tipo de desgaste se ve fuertemente afectado por las condiciones superficiales, tensiones residuales, dureza y microestructura del material.

Desgaste por abrasión:

El desgaste por abrasión se produce cuando dos superficies están en contacto físico directo y una es más dura que la otra. Las asperezas superficiales de la superficie más dura presionan sobre la más blanda provocando una deformación plástica en ella. Si en estas condiciones se realiza un movimiento relativo, se produce una eliminación de material de la superficie más blanda. Este desgaste está causado frecuentemente por materiales no metálicos, aunque las partículas metálicas pueden causar también abrasión.

En aplicaciones industriales se estima que el cincuenta por ciento de los procesos de desgaste se producen por abrasión, siendo de gran importancia para ello la dureza de los materiales (y por tanto, de factores metalúrgicos como los tratamientos térmicos o los procesos de endurecimiento por deformación).



Desgaste por adhesión:

En este tipo de mecanismos las interacciones de los materiales juegan un papel primordial. Estos procesos de desgaste se inician por uniones interfaciales (microsoldaduras) que se forman al entrar en contacto dos materiales bajo el efecto de una carga y sin encontrarse presentes partículas abrasivas. La aplicación de una carga que produzca la superación del límite elástico del material, junto a la existencia de un deslizamiento continuo puede provocar la formación de microsoldaduras, su posterior rotura y una nueva formación de las mismas. Esta cadena de sucesos provoca adhesiones, roturas superficiales y la formación de partículas de desgaste. Así, en una superficie que ha fallado por este mecanismo de desgaste se puede observar transferencia de material de una superficie a la otra, donde se ha adherido fuertemente.

El desgaste por adhesión está directamente relacionado con la tendencia de los materiales a formar soluciones sólidas o intermetálicos. Además influyen factores como la estructura cristalina o la orientación cristalina.

Desgaste triboquímico o por corrosión:

Este tipo de desgaste implica la interacción entre la superficie de desgaste y el agente corrosivo. Cuando se combinan corrosión y desgaste, la pérdida de material puede acelerarse significativamente. El proceso incluye la rotura y eliminación de la película de óxido, llevando a la exposición de la superficie activa del metal con el ambiente, la disolución o repasivación de la superficie expuesta del metal, la interacción entre la rugosidad deformada elásticamente y el medio, y la interacción entre las áreas deformadas plásticamente y el ambiente. Por lo tanto, además de la deformación y la adhesión, hay que tener en cuenta la química de la formación de productos de reacción. La naturaleza exacta del proceso de desgaste por corrosión es muy dependiente del metal específico y el agente corrosivo.

3.1.4 - PREVENCIÓN DEL DESGASTE

Los factores que dominan los procesos de desgaste son el diseño, la lubricación, el ambiente y el material empleado. La mejor forma de prevenir el desgaste es prevenir el contacto físico directo de los componentes de un sistema en movimiento. Aunque hay diversas formas de realizarlo (empleando campos magnéticos para separar las superficies, o interponiendo elementos de deformación elástica como elastómeros), la más importante es el empleo de lubricantes.

Los lubricantes evitan o disminuyen el peligro de degradación superficial. El lubricante puede introducirse a presión entre las superficies (lubricación hidrostática), o bien el movimiento relativo provoca la presión en el lubricante (lubricación hidrodinámica).

La lubricación hidrostática se emplea si la velocidad relativa de las superficies es pequeña o cuando deba impedirse el contacto directo entre superficies.



Dentro de la lubricación hidrodinámica se distinguen distintos regímenes que dependen de la geometría, los materiales, las condiciones de operación y la separación de las superficies.

Si estas soluciones no son posibles al no poderse separar completamente los componentes, se pueden realizar tratamientos superficiales que mejoren la resistencia al desgaste del material. Así, se pueden depositar recubrimientos (como la deposición electroquímica o el “plasma spraying”), provocarlos químicamente (como el anodizado de las aleaciones de titanio o aluminio), o provocar los recubrimientos por difusión en un metal (como la carburación o la nitruración superficiales del acero).

3.1.5 - LOS ACEROS INOXIDABLES PARA APLICACIONES DE DESGASTE

Los aceros inoxidable se encuentran en aplicaciones en las que los componentes están sujetos a condiciones de desgaste y además se requiere la buena resistencia frente a la corrosión que ofrecen los aceros inoxidable. Así, las situaciones en las que tienen lugar procesos de desgaste triboquímico (o con corrosión) son muy atractivas para los aceros inoxidable, debido a su capacidad para resistir la eliminación de su película protectora de óxido. Esto es de especial importancia en la industria de la minería, como ocurre en los procesos de manejo de las pulpas de carbón y las menas metálicas.

Los aceros inoxidable austeníticos se pueden usar satisfactoriamente en los procesos de cavitación, donde se produce una combinación de desgaste por fatiga y desgaste químico. En los procesos de desgaste por adhesión, la dureza de los aceros inoxidable es de gran importancia; así, en los grandes martensíticos se requiere un mínimo de 53 HR_C de dureza, mientras que en los austeníticos es crítica la dureza obtenida por los procesos de endurecimiento por acritud, así como los elementos de aleación añadidos que aumenten la estabilidad de la capa pasiva.

Además del equipamiento de manipulación del carbón, donde se unen la abrasividad del carbón con la corrosividad de la pulpa (desplazamiento y choque de la mena; canalones, revestimientos, cintas transportadoras, tolvas, alimentadores, cribas...), existen otras aplicaciones para desgaste de los aceros inoxidable. Por ejemplo, en la industria alimentaria, donde está prohibido el uso de lubricantes y se produce desgaste por el rozamiento entre metales o en la industria del azúcar, donde puede haber partículas que sean atrapadas entre superficies aumentando el desgaste, los aceros inoxidable se emplean en cintas, abrazaderas, bombas y válvulas. En la exploración de gas y petróleo, los ambientes corrosivos presentes requieren el empleo de aceros inoxidable, por ejemplo, en sondeos, brocales o válvulas. En la industria del automóvil se emplean en las válvulas que dirigen los gases de expulsión calientes desde el carburador; en la industria nuclear se emplean en el circuito primario de refrigeración de agua sustituyendo a las aleaciones de cobalto para evitar la presencia de isótopos radiactivos en el reactor. Finalmente, destacar que se emplean en bombas y válvulas sustituyendo a aceros al carbono en medios ligeramente corrosivos para tener una mayor vida en servicio, y sustituyendo a aleaciones base cobalto (estellitas) debido a su menor coste.

3.1.6 - MEDIDA DEL DESGASTE

No existe una forma única o normalizada para expresar la velocidad de desgaste, aunque se emplean los siguientes métodos:

- Volumen eliminado de material por unidad de tiempo, por unidad de longitud recorrida, por revolución del componente, o por oscilación del cuerpo.
- Pérdida de volumen por unidad de fuerza normal y distancia recorrida.
- Pérdida de peso por unidad de tiempo.
- Variación de una dimensión por unidad de tiempo.
- Variación relativa en dimensión o volumen con respecto a los mismos cambios en otra sustancia de referencia.

Muchas veces se emplea el coeficiente de desgaste, un número adimensional que representa el factor de proporcionalidad k en la ley de desgaste de Archard:

$$V = \frac{k \cdot W \cdot S}{C \cdot H}$$

, donde

V = volumen perdido

W = carga normal aplicada

S = distancia total recorrida

H = dureza

C = constante geométrica (toma 1 para abrasión y 3 para adhesión)

Dado que la dureza y la constante geométrica dependen de la microestructura del material, no deberían aparecer en la ecuación de forma independiente, y se reescribe:

$$A = k \cdot W \cdot S$$

De aquí se estiman los coeficientes de desgaste empleando la fórmula convencional (DIN 50321):

$$K \left(\frac{m^2}{N} \right) = \frac{\text{pérdida de material (m}^3\text{)}}{\text{carga aplicada (N)} \cdot \text{distancia recorrida (m)}}$$

3.2 - LUBRICACIÓN

3.2.1 - INTRODUCCIÓN

El propósito de la lubricación es introducir un “tercer cuerpo” entre las dos superficies de fricción con la finalidad de reducir ésta y el desgaste, transferir el calor que se genera y arrastrar las partículas de desgaste que surgen en el proceso.

Es condición necesaria que este tercer cuerpo presente un esfuerzo tangencial de corte menor que el de las dos superficies originalmente en contacto, de tal forma que condicione a este tercer cuerpo el cortante y así disminuir el coeficiente de fricción. El tercer cuerpo, o sea, el lubricante, puede ser sólido, líquido o gaseoso.

El proceso de lubricación puede tomar diferentes formas dependiendo de:

- La geometría de contacto entre los dos cuerpos.
- La rugosidad y textura de las superficies en contacto.
- La carga, presión y temperatura.
- La velocidad de deslizamiento o rodamiento.
- Las condiciones ambientales.
- Las propiedades fisicoquímicas del lubricante y otras.

Existen dos formas básicas para las superficies lubricadas:

- *La forma coincidente* - Aparece por lo general en cojinetes fiables de deslizamiento, en guías de máquinas y en sellos. Las superficies son separadas por una capa gruesa de lubricante que trabaja en un rango hidrodinámico por la velocidad de la superficie o hidrostático por una presión externa del lubricante. Son importantes la viscosidad y el coeficiente de temperatura de la viscosidad. Se presenta también en turbinas, compresores y bombas.
- *La forma no coincidente* - Tiene lugar en áreas concentradas y pequeñas (conocidas como conjuntos hertzianos). El espesor del lubricante en este caso es muy pequeño, del mismo orden de la rugosidad superficial, y la presión del lubricante es elevada. Se afecta de manera significativa por la deformación elástica de las superficies en contacto y es muy importante el coeficiente de temperatura de viscosidad. También resultan de importancia la rugosidad superficial y la textura.

En todos los casos, la capa lubricante se deteriora rápidamente bajo condiciones de extrema presión, extrema temperatura, bajas velocidades de rodadura o deslizamiento, y también velocidades elevadas. Para corregir estos defectos se emplean los aditivos. La pérdida de lubricación influye significativamente en la fatiga de contacto, sobretodo en engranajes.

3.2.2 - TIPOS DE LUBRICACIÓN

Pueden distinguirse tres formas distintas de lubricación:

- **Lubricación hidrodinámica:** Las superficies están separadas por una película de lubricante que proporciona estabilidad. No se basa en introducir lubricante a presión, aunque puede hacerse, sino que exige un caudal de aceite, y la presión se genera por movimiento relativo. Se habla también de lubricación de película gruesa, fluida, completa o perfecta.
- **Lubricación límite:** La película de lubricante es tan fina que existe un contacto parcial metal-metal. La acción resultante no se explica por la hidrodinámica. Puede pasarse de lubricación hidrodinámica a límite por una caída de la velocidad, un aumento de la carga o una disminución del caudal del aceite. En este tipo de lubricación (de película delgada, imperfecta o parcial), más que la viscosidad del lubricante, se le otorga más importancia a la composición química.
- **Lubricación hidrostática:** Se obtiene introduciendo a presión el lubricante en la zona de carga para crear una película de lubricante, no siendo necesario el movimiento relativo entre las superficies.

3.2.3 - LA LUBRICACIÓN EN LA FRICCIÓN Y EL DESGASTE DE LOS ELEMENTOS DE MÁQUINA

En el estudio de la influencia de la lubricación en el desgaste de los elementos de máquina es necesario diferenciar el trabajo de fricción con capas gruesas de lubricante líquido que surge entre dos superficies metálicas en el deslizamiento de una contra otra y el trabajo de fricción con capas límites delgadas de sustancias lubricantes.

El significado de la acción lubricante durante la fricción fluida se determina principalmente por sus propiedades viscosas.

En condiciones ideales de lubricación fluida se garantiza el que no haya contacto entre las superficies. El lubricante forma una capa intermedia entre las superficies y así el proceso de fricción seca entre las dos superficies se convierte en un proceso de fricción interna en la propia sustancia lubricante.

El fundamento de la teoría hidrodinámica permitió elaborar a su vez una teoría de la lubricación fluida que fue conformada experimentalmente y aplicada en la práctica. Así, en todos los casos en que entre las superficies de deslizamiento no se cumplen las condiciones de lubricación hidrodinámica (tales como: alta presión específica, bajas velocidades de traslación relativa, poco lubricante) las características fundamentales de fricción y desgaste se determinan por la presencia de una fina capa de material lubricante que es absorbida por la superficie de fricción.

La estabilidad de esta capa depende de sus propiedades oleaginosas, cuya naturaleza no ha sido suficientemente definida.



La capa delgada está ligada muy fuertemente a las superficies metálicas por fuerzas de adsorción. La fricción en tal lubricación se llama "límite" y en ella pierde el sentido la aplicación de todas las leyes de la fricción fluida.

Las capas finas límites se comportan como cuerpos plásticos, y tienen una determinada resistencia al cortante. Las investigaciones han demostrado que ellas poseen capacidad para disminuir la fricción, protegiendo así las superficies. Este efecto se debe a que en las capas límites muy finas surgen presiones que no sólo evitan el acercamiento y el contacto entre las superficies, sino una tendencia a separarlas. La presión aumenta con la disminución de la holgura.

La acción de separación se incrementa con la velocidad, o sea, no sólo tiene un carácter estático, sino también dinámico. Esto es muy importante, ya que el lubricante que cubre las superficies sufre un desplazamiento relativo.

Las capas límites son como cuerpos mono o policristalinos que surgen con base en una función embrionaria de la primera capa. Su crecimiento posterior está limitado por interferencias en la orientación de las capas de moléculas y por el calor generado en el movimiento.

En las propiedades de las capas de lubricación límite también influyen las características de la capa metálica, sobre todo en lo concerniente a las fuerzas de campo de la red, lo que incide en la fijación de la primera capa de moléculas y por tanto en la capa límite. Su efecto en el surgimiento de otras capas es menor.

En ocasiones, las capas límites de materiales lubricantes pueden ser destruidas por la acción simultánea de las dos superficies metálicas.

Algunas investigaciones, sobre el comportamiento de las capas límites, han demostrado que mientras mayor es la presión, mayor es su capacidad de resistirla, debido a que se incrementa su elasticidad. No obstante, a presiones y temperaturas dadas se presenta un punto de espesor crítico de la capa límite que varía entre 0.1 a 0.05 μm , por debajo del cual no existen síntomas de deslizamiento entre las capas moleculares.

Las capas finas de lubricante actúan no sólo disminuyendo considerablemente la fuerza de fricción, sino también influyen en el desgaste, incluso también puede disminuir la fuerza de fricción.

Esta acción no ha encontrado aún una explicación teórica adecuada, aunque la explicación más acertada parece ser que algunas capas reaccionan con el metal y el medio ambiente, y aunque disminuyen su fuerza de fricción (debido a la capa límite formada), ésta surge y desaparece, lo que va provocando simultáneamente el desgaste de la superficie.

La incorporación de aditivos a los lubricantes han permitido no sólo reducir la fuerza de fricción, también crear capas límites adecuadas que eviten la formación de estructuras que ocasionen el deterioro superficial.



La acción de los aditivos genera la llamada “fricción interna”, evitan la acción de las rugosidades al “penetrar” en el metal más activamente y sobre todo en las microgrietas que, por efecto de la deformación plástica superficial, surgen en el metal.

Es por ello que en los elementos de máquina, y sobre todo en los más cargados, es muy importante brindar las condiciones de fricción, en que la capa lubricante “divida” o aísle convenientemente la superficie de fricción.

3.2.4 - LOS LUBRICANTES Y SUS CARACTERÍSTICAS

Son muy diversos los tipos de materiales que pueden utilizarse como lubricantes, por lo que de forma general se agrupan, de acuerdo con su estado físico, de la siguiente manera:

- Lubricantes gaseosos.
- Lubricantes líquidos.
- Lubricantes semisólidos.
- Lubricantes sólidos.

De estos lubricantes, la de más amplia utilización en la industria son los líquidos, siguiéndole en este orden de importancia los semisólidos, los sólidos y por último los gaseosos.

En este proyecto se ha utilizado un lubricante líquido, por lo que se pasa a describir la importancia de sus características más destacadas en relación con el presente proyecto.

3.2.4.1 - Lubricantes líquidos

Son aquellos que por sus características de fluidez se les designa como aceites lubricantes. Dentro de éstos están los aceites simples y los compuestos.

Los aceites simples, por su origen, se agrupan de la siguiente manera:

- Aceites minerales
- Aceites animales
- Aceites vegetales
- Aceites sintéticos

Los aceites compuestos se obtienen a partir de mezclas de aceites simples y de la adición de muy variados compuestos químicos denominados aditivos. Debe señalarse que dada la baja proporción en que se añaden a los aceites minerales, los de origen animal y vegetal, hacen que en la práctica se les considere también como aditivos, excepto en el caso de aplicaciones muy específicas de los aceites vegetales.

Los aceites de mayor utilización en la industria son los minerales de origen petrolífero mezclados con aditivos.



Propiedades de explotación de los aceites lubricantes

La función principal de los aceites lubricantes es la reducción o prevención del desgaste de las piezas que forman pares de fricción en las máquinas. Con la reducción del desgaste y la fricción, el aceite debe evacuar el calor de la zona de fricción, proteger las superficies lubricadas de la corrosión, reducir o prevenir la formación de suciedades sobre la superficie de las piezas (particularmente en los motores de combustión interna), así como en algunos casos cumplir funciones no inherentes a la lubricación, como es por ejemplo la transmisión de movimiento en los sistemas hidráulicos.

Para determinar la capacidad de los aceites para cumplir las referidas funciones, es necesario conocer sus principales propiedades de explotación, las cuales son:

- Propiedades de viscosidad
- Propiedades antidesgaste
- Densidad
- Propiedades calóricas
- Dilatación volumétrica
- Estabilidad
- Formación de espuma
- Emulsibilidad
- Corrosividad
- Acción sobre materiales no metálicos
- Humectabilidad y pegajosidad
- Lavabilidad
- Propiedades detergentes
- Combustibilidad
- Toxicidad

Las propiedades que están relacionadas con el objeto de este proyecto, que es la búsqueda de materiales óptimos para la fabricación de prótesis, son las de antidesgaste y las de corrosividad, si bien esta última no se ha tratado en el desarrollo del proyecto, por su importancia e interés se va a hablar sobre ella brevemente.

PROPIEDADES ANTIDESGASTE DE LOS ACEITES:

Esta propiedad expresa la influencia del aceite en los diferentes tipos de desgaste, como por ejemplo el corrosivo, por fatiga, agarrotamiento, picadura y otros. El carácter cualitativo y cuantitativo de tal influencia puede no ser siempre igual. De esta forma los aceites con propiedades de extrema presión mejoradas, en algunos casos, pueden provocar un desgaste corrosivo acelerado de las superficies y reducir el periodo de servicio de los mecanismos. De ahí la importancia de aplicar correctamente los lubricantes, porque aún cuando se crea que se está dando mayor calidad, si no se han observado los principios técnicos de aplicación, pueden ocasionarse daños irreparables a un equipo objeto de tal procedimiento.

La efectividad de la acción lubricante del aceite no sólo depende de sus propiedades específicas, sino también de la interacción del mismo con otros factores como son el



coeficiente de fricción y las propiedades y geometría de las superficies, entre otros. Es por ello que los aceites, para su aplicación, deben evaluarse en las condiciones específicas en que van a ser explotados.

CORROSIVIDAD:

Los aceites pueden ocasionar corrosión de las superficies cuando hay presencia de ácidos (producto de la oxidación del propio aceite o proveniente de otras fuentes), de agua o aditivos que pueden resultar agresivos a algunos metales.

La corrosión sobre los metales ferrosos ocurre generalmente por la presencia de aguas ácidos en el aceite. La corrosión de los metales no ferrosos y sus aleaciones se producen principalmente debido a la acción de ácidos orgánicos formados por la oxidación del aceite, así como por la acción de algunos tipos de aditivos; en este caso la corrosión puede incrementarse con aumentos de temperatura ya en el orden de los 100 °C.

Son especialmente sensibles a la corrosión el cobre, el plomo y el cadmio. La presencia de azufre formando compuestos con enlaces débiles en el aceite facilita la corrosión de dichos metales, los cuales se recubren con una capa oscura.

TIPOS DE DETERIORO DE LAS SUPERFICIES DE FRICCIÓN:

Las superficies durante la fricción pueden deteriorarse a causa de: desgarramiento, deformación plástica, fatiga, desgaste mecánica, corrosión y por fallos en la tecnología de acabado, entre las principales causas.

Es de importancia en la búsqueda de materiales óptimos para la fabricación de prótesis el deterioro por desgaste mecánico, que es el que se ha tratado en este proyecto, el deterioro por corrosión y el deterioro por fatiga.

El desgaste mecánico se origina por los contactos intermitentes entre las microrrugosidades de las superficies de fricción, el que con mayor o menor intensidad es inevitable en la práctica. Por esta causa ocurre el desprendimiento progresivo de partículas metálicas que salen de la zona de fricción con la consecuente pérdida de masa de la pieza. El retardo de este tipo de desgaste se logra eficientemente con lubricantes que aseguren una adecuada capa de absorción en las condiciones de lubricación límite.

El desgaste por fatiga surge debido a la acción de tensiones cíclicas de contacto en las capas superficiales del metal; estos esfuerzos pueden dar como resultado grietas profundas de fatiga y finalmente la aparición de picaduras y escamas, como es posible apreciar en pistas de rodamientos, en las caras de los dientes de los engranajes, en los conjuntos levas-empujadores, etc. La reducción del desgaste por fatiga es posible con el empleo de materiales adecuados y el uso de aceites lubricantes con aditivos especiales, que transforman este tipo de desgaste, con frecuencia catastrófico, en un benigno desgaste corrosivo.



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

PROYECTO FIN DE CARRERA



DESARROLLO DEL PROCESO EXPERIMENTAL



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

PROYECTO FIN DE CARRERA



4 - DESARROLLO DEL PROCESO EXPERIMENTAL

4.1 - INTRODUCCIÓN

Con el objetivo de estudiar el comportamiento tribológico de materiales porosos, se han elegido algunos aceros pulvimetalúrgicos y se han realizado con ellos diversas probetas, como aceros base, como mezclas y como bicapas. El fin es analizar el comportamiento de dichos aceros frente al desgaste y la lubricación, teniendo en cuenta cómo se han compactado las muestras, en qué proporción se han añadido los polvos de los aceros, etc.

Una vez seleccionados los materiales, se van a caracterizar los mismos, de forma microestructural y mecánica, con el fin de analizar qué materiales tienen unas propiedades más adecuadas para la fabricación de prótesis. Asimismo, un concepto que se ha considerado fundamental es la porosidad de los aceros, por lo que también se va a realizar un estudio de porosidad de los mismos, con el fin de estudiar su comportamiento al ser lubricados; para ello se van a realizar diversos ensayos en el tribómetro: desgaste seco, ensayo de desgaste con lubricación discontinua y ensayo de desgaste con lubricación interna.

En los ensayos de desgaste seco se ha puesto a punto un procedimiento de ensayo utilizando como técnica de ensayo el método "pin on disk". Se ha trabajado con dos presiones de compactación, 550 MPa y 750MPa, y con dos cargas de ensayo diferentes de 5N y 10N cuando ha sido necesario. Los ensayos de desgaste con lubricación se han realizado en las mismas condiciones tribológicas utilizando carboximetilcelulosa como lubricante, el cual es uno de los lubricantes utilizados más frecuentemente cuando se quieren simular ambientes fisiológicos. Se han realizado dos tipos de ensayos: uno en el que el lubricante se ha introducido en los poros mediante una prensa de vacío y otro en el que se ha utilizado lubricación con flujo discontinuo, mezcla de lubricante y aire comprimido durante una secuencia cíclica determinada.

4.2 - COMPACTADO Y SINTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS

4.2.1 - MATERIALES

Los materiales base de los que se parte para, posteriormente, obtener las diferentes muestras objeto del proyecto son los siguientes:

- Acero inoxidable ferrítico sinterizado 430L atomizado por agua con tamaño de grano estándar (53-150 μ), cuya composición química es:

	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	Si (%)	C (%)	N (%)	O (%)
430L	16	0.2	0.01	0.88	<0.03	<0.03	<0.03

- Acero inoxidable ferrítico sinterizado 431L atomizado por gas con tamaño de grano estándar (53-150 μ), cuya composición química es:

	Cr (%)	NI (%)	S (%)	Si (%)	C (%)	Fe (%)
430L	15.61	1.65	0.006	0.58	0.008	BASE

- Acero inoxidable austenítico sinterizado 316L atomizado por agua, cuya composición química es:

	Cr (%)	NI (%)	Mo (%)	Si (%)	C (%)	Cu (%)
316L	16.1	13.55	2.24	0.87	0.021	0.02

Se va a trabajar con este acero base utilizando diferentes tamaños de grano:

- Grano estándar: 53-150 μ m
 - Grano medio: 300-500 μ m
 - Grano grande: 500-710 μ m
- Acero inoxidable austenítico sinterizado 316L atomizado por gas con tamaño de grano estándar (53-150 μ), cuya composición química es:

	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	Si (%)	C (%)	Fe (%)	Mn (%)
316L	17	12.5	2.5	0.8	0.024	BASE	1.3

4.2.2 - MUESTRAS

Se van a diferenciar tres grupos a la hora de trabajar con las diferentes muestras: aceros puros, mezclas y bicapas; además va a haber dos presiones de compactación: 550 MPa y 750 MPa.

4.2.2.1 - Aceros base

Las muestras de aceros base van a tener un diámetro de 12 milímetros y con la ayuda de una báscula se van a compactar vertiendo 4,5 gramos en el caso de los polvos con tamaño de grano estándar y 2,6 en caso de los polvos con tamaño de grano más grueso.



Báscula digital

Las muestras compactadas son las siguientes:

- **430L** - 100% polvo ferrítico atomizado por agua, con tamaño de grano estándar, menor que 150 μm .
- **316L** - 100% polvo austenítico atomizado por agua, con tamaño de grano estándar, menor que 150 μm .
- **316L [300 - 500 μm]** - 100% polvo austenítico atomizado por agua, con tamaño de grano entre 300 y 500 μm .
- **316L [500 - 710 μm]** - 100% polvo austenítico atomizado por agua, con tamaño de grano entre 500 y 710 μm .

4.2.2.2 - Mezclas

Las muestras de las mezclas van a tener un diámetro de 12 milímetros. Para preparar cada mezcla, se introducen los polvos previamente pesados y en la proporción deseada (en este caso, en ambas mezclas la proporción es 50% - 50%) en el agitador de polvos y se mezclan los mismos por agitación durante aproximadamente treinta minutos hasta conseguir una mezcla homogénea. Posteriormente se abre el agitador y se obtiene la cantidad de polvos correspondiente que se vaya a utilizar.



Agitador de polvos

Las muestras compactadas son las siguientes:

- **Dúplex 50/50** - 50% polvo ferrítico + 50% polvo austenítico atomizado por agua, con tamaño de grano estándar.
- **Mezcla Austenítica** - 50% de polvo austenítico atomizado por agua con tamaño de grano entre 300 y 500 μm + 50% de polvo austenítico atomizado por agua con tamaño de grano entre 500 y 710 μm .

4.2.2.3 - Bicapas

En el caso de las bicapas hay que tener especial cuidado a la hora de compactar las muestras, puesto que es de vital importancia diferenciar ambas capas. En primer lugar se verterá en la matriz de compactación la cantidad de la capa de acero base, en la proporción deseada: en el caso de que la proporción sea de $\frac{2}{3}$ se verterán 3 gramos, y en el caso de que la proporción sea de $\frac{1}{2}$ se verterán 2,25 gramos. Posteriormente se vierte la capa de la mezcla, que se habrá preparado de la manera descrita en el apartado anterior, vertiendo 1,5 gramos en el caso de que la proporción sea de $\frac{2}{3}$ y 2,25 gramos en el caso de que la proporción sea de $\frac{1}{2}$. En el caso de la bicapa Austenítica, al tener una densidad diferente los materiales que componen dicha bicapa debido al tamaño de grano, se verterán 1,3 gramos en cada capa. Los discos tendrán 12 milímetros de diámetro, al igual que las demás muestras.

Las muestras compactadas son las siguientes:

- ***Bicapa 316L [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$]***
 - *Capa 316L [$\frac{2}{3}$]* - Acero 316L atomizado por agua con tamaño de grano estándar.
 - *Capa Mezcla 316L [$\frac{1}{3}$]* - 90% de polvo atomizado por agua de acero 316L + 10% de polvo atomizado por gas de acero 316L, con tamaño de grano estándar

- ***Bicapa 316L [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$]***
 - *Capa 316L [$\frac{1}{2}$]* - Acero 316L atomizado por agua con tamaño de grano estándar.
 - *Capa Mezcla 316L [$\frac{1}{2}$]* - 90% de polvo atomizado por agua de acero 316L + 10% de polvo atomizado por gas de acero 316L, con tamaño de grano estándar.

- ***Bicapa 430L [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$]***
 - *Capa 430L [$\frac{1}{2}$]* - Acero 430L atomizado por agua con tamaño de grano estándar.
 - *Capa Mezcla 430L [$\frac{1}{2}$]* - 90% de polvo atomizado por agua de acero 430L + 10% de polvo atomizado por gas de acero 431L, con tamaño de grano estándar.

- ***Bicapa 430L [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$]***
 - *Capa 430L [$\frac{2}{3}$]* - Acero 430L atomizado por agua con tamaño de grano estándar.
 - *Capa Mezcla 430L [$\frac{1}{3}$]* - 90% de polvo atomizado por agua de acero 430L + 10% de polvo atomizado por gas de acero 431L, con tamaño de grano estándar.

- ***Bicapa 50/50 [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$]***
 - *Capa 50/50 [$\frac{2}{3}$]* - Dúplex 50/50 atomizado por agua con tamaño de grano estándar.
 - *Capa Mezcla 50/50 [$\frac{1}{3}$]* - 50% de acero 316L de polvo atomizado por agua + 30% de acero 430L de polvo atomizado por agua + 20% de acero 431L de polvo atomizado por gas, con tamaño de grano estándar.

- **Bicapa Austenítica [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$]**
 - *Capa 316L [300 - 500 μm] [$\frac{1}{2}$]* - Acero 316L atomizado por agua con tamaño de grano entre 300 y 500 μm .
 - *Capa 316L [500 - 710 μm] [$\frac{1}{2}$]* - Acero 316L atomizado por agua con tamaño de grano entre 500 y 710 μm .

Una vez pesadas las cantidades deseadas de los diferentes aceros, se procede a la compactación de las probetas. Ésta se realiza en una prensa hidráulica de compactación de simple efecto controlada mediante un equipo dotado con software específico y una matriz de compactación. Se aplicará una carga de 84 kN, que corresponde a la tensión de compactación de 750 MPa, o de 62 kN, que corresponde a la tensión de compactación de 550 MPa. El tiempo de compactación serán tres minutos.



Matriz de compactación

Los pasos que hay que seguir para realizar una buena compactación son los siguientes:

- Limpiar bien las superficies de la prensa y la matriz de compactación, ya que están en contacto directo con los polvos.
- Impregnar la matriz con el polvo lubricante Estearato de Zinc, para extraer la probeta compactada con facilidad y sin dañarla.
- Depositar, cuidadosamente y sin derramarlos, los polvos en la matriz de compactación.
- Situar en contacto el pistón de compactación con la matriz.
- Introducir los parámetros correspondientes en el ordenador que controla la prensa.
- Comenzar la compresión.
- Una vez que la prensa alcance la carga límite, se mide con la ayuda de un cronómetro el tiempo de compactación.

- Transcurrido ese tiempo, se detiene la compactación
- Por último, se retira la probeta

Esta compactación se realiza a humedad y temperatura ambiente.



Prensa hidráulica de compactación

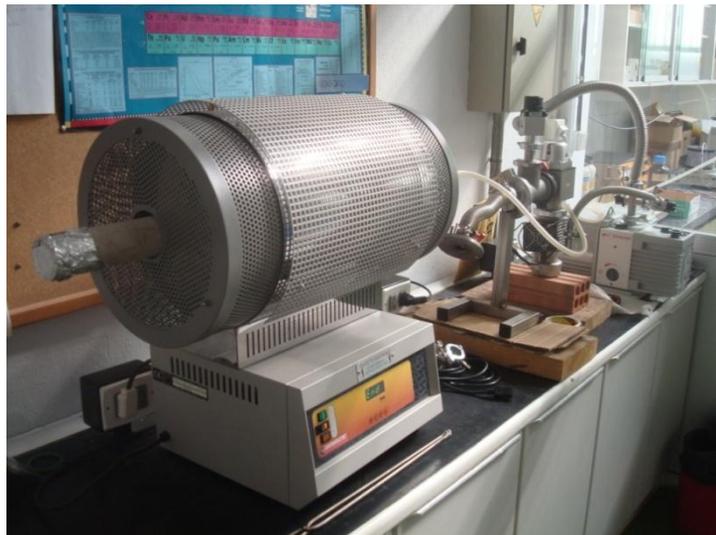


Equipo que controla la prensa

Una vez fabricadas todas las probetas, éstas se sinterizan introduciéndolas en el horno y calentándolas hasta 1250 °C en atmósfera de N₂-H₂ (95% - 5%) durante una hora. El equipo utilizado para la sinterización consta de un horno, una bombona de gas licuado y utensilios para colocar y retirar las probetas.

El proceso de sinterización que se ha llevado a cabo consta de los siguientes pasos:

- Se conecta la salida de la bombona de gas de mezcla nitrógeno-hidrógeno con la cavidad donde se sinterizan las probetas
- Se introducen cuatro probetas en el horno
- Se tapan los extremos de la cavidad donde se encuentran las probetas, con el objetivo de crear las mejores condiciones posibles
- Se abre la bombona de gas y a continuación se enciende el horno
- Cuando se alcancen 1250 °C se sinterizan las probetas durante una hora a temperatura constante
- Transcurrido ese tiempo, las probetas ya están listas para el enfriamiento.



Horno de sinterizado

A continuación se procede al enfriamiento en el horno, el cual es muy lento y consiste en dejar que las probetas se enfríen en el mismo horno en el que se han calentado. Cuando la temperatura del horno desciende hasta la temperatura ambiente, se sacan las probetas. Durante el enfriamiento hay que mantener circulación de gas, ya que si esto no ocurre se pueden producir oxidaciones no deseadas.



Las probetas compactadas se resumen en el siguiente cuadro:

Muestra	Carga aplicada (kN)	Tensión de compactación (MPa)	Tiempo de compactación (s)
316L (750 MPa)	84	750	180
316L (550 MPa)	62	550	180
430L (750 MPa)	84	750	180
430L (550 Mpa)	62	550	180
316L [300-500 μ m] (750 MPa)	84	750	180
316L [300-500 μ m] (550 MPa)	62	550	180
316L [500-710 μ m] (750 MPa)	84	750	180
316L [500-710 μ m] (550 MPa)	62	550	180
Dúplex 50/50 (750 MPa)	84	750	180
Dúplex 50/50 (550 MPa)	62	550	180
Mezcla Austenítica (750 MPa)	84	750	180
Mezcla Austenítica (550 MPa)	62	550	180
Bicapa 316L [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (750 MPa)	84	750	180
Bicapa 316L [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (550 MPa)	62	550	180
Bicapa 316L [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa)	84	750	180
Bicapa 430L [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (750 MPa)	84	750	180
Bicapa 430L [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 Mpa)	84	750	180
Bicapa 50/50 [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa)	84	750	180
Bicapa Austenítica [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (550 MPa)	62	550	180

4.3 - PREPARACIÓN DE LA PROBETA PARA SU CARACTERIZACIÓN

Para poder realizar una correcta caracterización de las probetas en estudio y conseguir que sea más fácil su manejo y manipulación se lleva a cabo todo un proceso de preparación y acondicionamiento. Una vez que se han sacado las probetas del horno, se llevan a cabo las siguientes etapas:

1. **Cortado:** Se corta la probeta por su parte central con una tronzadora de precisión con refrigeración. El cortado sólo se va a llevar a cabo para caracterizar las muestras. Para llevar a cabo los ensayos, también se prepararán las probetas desbastándolas, y en algunos casos empastillándolas. Se detallará en cada ensayo cómo se ha llevado a cabo la preparación de la probeta.



Tronzadora metalográfica

2. **Empastillado:** Se procede al empastillado de la probeta con metacrilato para su mejor manejo debido a sus reducidas dimensiones. Una de las caras de la probeta formará parte de una de las caras exteriores de la pastilla, cara en la que posteriormente se realizarán los ataques correspondientes, así como los ensayos de macrodureza y microdureza y el estudio de la densidad.



Empastilladora

- 3. Desbaste:** En necesario desbastar la cara de trabajo, es decir, la cara sobre la cual se van a realizar los ensayos. Para ello se utilizan papeles de lijas montados en pulidoras de tamaño de grano creciente, comenzando con un P180 y terminando con un P1000.



Desbastadoras mecánicas

- 4. Lavado en baño de ultrasonidos:** Una vez desbastada la probeta, se introduce la misma en un baño de ultrasonidos durante un tiempo que oscila entre 30 y 60 segundos, con el fin de limpiar la superficie de trabajo de dicha probeta



Máquina de limpieza por ultrasonidos

- 5. Pulido:** A continuación se procede a pulir la probeta con discos de fieltro empapado en líquido con partículas abrasivas en suspensión.



Pulidora mecánica



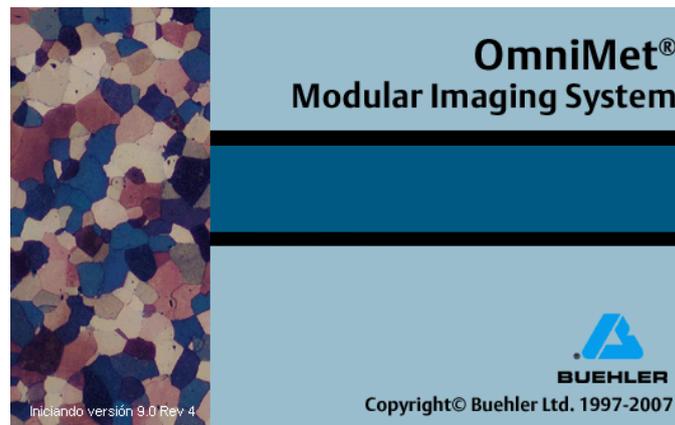
- 6. Secado:** Posteriormente al pulido de la probeta, se vuelve a introducir en el baño de ultrasonidos y posteriormente se seca la probeta con aire caliente.

Una vez que se han llevado a cabo todos estos pasos, la probeta ya está lista para ser caracterizada.

4.4 - ESTUDIO DE POROSIDAD

Una vez que se ha constatado que la porosidad superficial es análoga en todas las caras de las piezas, lo que es indicativo de una homogénea distribución de la presión ejercida sobre la pieza en el proceso de compresión, se procede a la adecuada preparación superficial de las probetas y a su observación, una vez que las mismas han sido correctamente desbastadas y pulidas, a cien aumentos.

El estudio de metalografía cuantitativa relativo a la porosidad superficial se lleva a cabo mediante técnicas de análisis de imagen utilizando como software de aplicación el programa Buehler OmniMet 9.0, disponible en el laboratorio.



En cada probeta de acero base (316L y 430L) y de dúplex 50/50 se analizan siete campos elegidos de tal forma que sean representativos del total de la sección, mientras que en cada bicapa se eligen tres campos en cada capa.

El estudio realizado permite obtener el grado de porosidad superficial y el área de los poros, parámetros que van a ser objeto de estudio en este proyecto, así como una gran cantidad de parámetros significativos, tales como la esfericidad de los poros, el perímetro de los mismos, etc. Los resultados obtenidos serán objeto de estudio y análisis.



Equipo de estudio metalográfico

4.5 - CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL

Se ha llevado a cabo sobre las probetas en estudio un proceso de preparación de las probetas, descrito anteriormente. Además, para poder realizar correctamente la caracterización microestructural de las probetas, se han de hacer los siguientes pasos:

- **Taladro para ataque electrolítico:** Se realiza un taladro en el metacrilato por la base de la probeta empastillada, lo más perpendicular posible, de forma que se pueda acceder a la probeta. Debe hacerse con una precisión escrupulosa, con el objetivo de que en la siguiente operación de roscado no se rompa la probeta y haya que repetir la preparación de la muestra.



Taladradora

- **Roscado:** Una vez realizado el taladro hasta la probeta, se realiza una rosca interna mediante el macho de roscar para que, posteriormente, se pueda roscar una varilla de cobre para mejorar la conectividad.

4.5.1 - ATAQUE ELECTROLÍTICO CON ÁCIDO OXÁLICO

Este ensayo apareció en 1953 gracias a Streicher. El fundamento del ensayo se recoge en la norma ASTM A-262 y consiste en realizar un ataque electroquímico sobre el material objeto de ensayo, que actuará como ánodo en una solución acuosa de ácido oxálico al 10% como cátodo la probeta a analizar.

Se utilizan como parámetros de ataque los siguientes:

- Densidad de corriente: 1 amperio/cm².
- Tiempo de ensayo: 30 segundos.

Como resultado del ensayo se produce un ataque selectivo a las fases ricas en cromo, como es en el caso de los carburos precipitados en borde de grano y, por tanto, no se revelan



las zonas empobrecidas en cromo. De lo dicho, se deduce que los resultados que se alcancen serán básicamente de carácter orientativo, puesto que la presencia de carburos precipitados no lleva asociada necesariamente un empobrecimiento en cromo y elimina la descromización.

Los resultados que se obtienen en este ensayo derivan de la observación microscópica de la muestra atacada. Las microestructuras observadas se clasifican en tres categorías básicas:

- *Estructura escalonada (step)*: Si está libre de carburos en borde de grano.
- *Estructuras en fosas (ditch)*: Cuando uno o más granos están totalmente rodeados por carburos.
- *Estructura dual (dual)*: Si los granos están parcialmente rodeados de carburos.

De acuerdo con la norma, este ensayo sirve como método rápido para la aceptación de materiales: de esta manera, el material que supera el ensayo, es decir, presenta estructuras step o dual, se considera como aceptable. La no superación del ensayo (estructura ditch) no supone el rechazo del material de recepción, sino que implica la necesidad de realizar un ensayo diferente para su aceptación o rechazo.

Las ventajas de este ensayo son claramente su rapidez y carácter no destructivo. Sin embargo, tiene inconvenientes tales como el requerimiento de otros ensayos para el rechazo del material y su carácter cualitativo.

Estos inconvenientes están, en cierta manera, superados, ya que actualmente en lo referente a recepción del material se han desarrollado especificaciones que ya evalúan la calidad del acero en base a este ensayo, de tal forma que la no superación de esta práctica supone el rechazo automático del material sin necesidad de recurrir a otros ensayos. Estas especificaciones se establecen lógicamente para materiales empleados en aplicaciones de alta responsabilidad como en la industria nuclear.

En torno a su carácter cualitativo, también se han desarrollado modificaciones del ensayo, consistentes en una valoración cuantitativa del grado de sensibilización mediante el uso de patrones de comparación o mediante la medición del porcentaje de borde de grano afectado; en este sentido, las nuevas técnicas de análisis de imagen automático suponen una gran ventaja.

Desarrollo del ensayo de ataque electrolítico con ácido oxálico

Una vez que se ha preparado la muestra, el ataque se realiza tal y como especifica la norma, con una disolución de ácido oxálico al 10% en peso y a temperatura ambiente. La probeta a ensayar, que actuará como ánodo, con la ayuda de la varilla de cobre mencionada anteriormente, se conecta al cátodo de acero inoxidable inserto en la pulidora electrolítica y se hace pasar una densidad de corriente de 1 amperio/cm² durante 30 segundos.



Fuente de alimentación empleada para generar la diferencia de potencial

La muestra atacada se lava rápidamente para eliminar los restos de la solución ácida y se seca con alcohol y aire caliente. En estas condiciones, la muestra ya está preparada para la observación en el microscopio metalográfico.

4.5.2 - ATAQUE CON REACTIVO DE VILELLA

Este ensayo revela la microestructura general de los aceros inoxidables, y consiste en atacar la superficie con reactivo de Vilella con una disolución formada por un gramo de ácido pícrico, 5 mililitros de ácido clorhídrico y 95 mililitros de etanol.

La mezcla toma un color amarillento debido al ácido pícrico, y en función de la probeta de estudio, se determinará el tiempo que tiene que estar el reactivo en contacto con la superficie de estudio. Este tiempo variará desde los 30 segundos hasta los 5 minutos. Una vez realizado el ataque, la muestra estará preparada para el estudio microestructural mediante análisis de imagen, con el objeto de identificar las diferentes fases y microconstituyentes que integran la probeta.

4.5.3 - MICROSCOPÍA ÓPTICA

Los aceros base, los dúplex y las bicapas son objeto de un estudio microestructural completo mediante microscopía óptica que va a permitir la caracterización del acero. Las probetas son sometidas a la acción del ataque electrolytico con ácido oxálico con el fin de revelar las diferentes fases y los posibles microconstituyentes que las integran.

El estudio se lleva a cabo, al igual que el estudio de porosidad, mediante técnicas de análisis de imagen utilizando como software de aplicación el programa Buehler OmniMet 9.0, disponible en el laboratorio.



4.6 - CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

4.6.1 - ENSAYO DE MICRODUREZA

El ensayo de microdureza debe su nombre a que se produce una impresión microscópica al ensayar las muestras.

Este ensayo se usa en los laboratorios metalográficos y sus aplicaciones pueden ser para efectuar mediciones de la naturaleza de superficies muy pequeñas, tales como un grano cristalino. Esta medición se verifica en muestras preparadas en la misma forma que para una observación microscópica, y para conocer, por ejemplo, la microdureza de una fase pura, separada del resto de la estructura, como también para la de alguna impureza de alguna muestra.

Los ensayos de microdureza se llevan a cabo con cargas bajas, generalmente por debajo de 1,96 newton (200 gramos) y ocupan un volumen de material tan limitado que los poros del material sinterizado no están implicados en la deformación plástica, o sólo para una extensión o área muy limitada. Esto implica que cuando los ensayos de microdureza y los métodos de ensayos aplicados para aceros convencionales son usados en materiales sinterizados, la microdureza puede estar influenciada tanto por la carga del ensayo como por la forma del penetrador. Los resultados de los ensayos deberían, entonces, ser considerados como relativos más que valores absolutos.

Los ensayos de microdureza sirven para determinar la dureza real superficial, al contrario que la dureza indicada en los ensayos de macrodureza.

4.6.1.1 - Descripción del ensayo de microdureza

Es posible usar ambos, tanto ensayo Vickers como el Knoop. Cuando se decida la carga del ensayo que va a ser aplicada, deberían tenerse en cuenta los siguientes puntos:

- A menos que el producto sinterizado tenga una densidad muy cercana a la densidad teórica, el efecto de la porosidad comienza a ser apreciable en cargas iguales o por encima de 0,49 newton (50 gramos).
- Es preferible un amplio y disperso rango de resultados debido a las pequeñas dimensiones de las marcas, lo que las hace más difíciles para leer con los sistemas ópticos estándar de ensayos de microdureza.
- Se van a dar valores más altos de dureza debido a la reducida influencia de la porosidad y a una ley general válida para ensayos de microdureza.
- Se darán un número grande de marcas irregulares, que deberán ser desechadas y reemplazadas.

La experiencia práctica y la norma ISO aconsejan una carga de 0.98 newton (100 gramos) tanto para ensayos Vickers como para ensayos Knoop.

El ensayo Vickers es considerado como el más adecuado, y es el que se va a usar.



La superficie donde los penetradores deben actuar tiene que estar pulida, y la zona donde se van a situar las marcas debe ser elegida de tal forma que haya una región libre de porosidad visible en un círculo cuyo radio sea igual a la diagonal del penetrador. No deben existir grietas, “hundimientos”, “pillin up” o “hinchazones” en los bordes y esquinas de las marcas. Las esquinas deben estar bien definidas. Las marcas sólo se consideran aceptables bajo estas condiciones.

El penetrador es un diamante muy cuidadosamente y finamente pulido, con forma de rombo. Este penetrador está montado en el microscopio en la ubicación y posición que corresponde al objetivo. Debido a esta posición y al hecho de que los microscopios de uso común pueden tener un dispositivo para pasar del uso de un objetivo al de otro, montado en una corredera circular giratoria, sucede que, después de haber observado un punto de la muestra con este microscopio, se puede enfrentar después, el diamante, sobre el mismo punto para proceder a medir su microdureza y viceversa.

Se va a hacer una medición directa de la impresión dejada sobre la muestra por parte del diamante. Los resultados obtenidos son la dureza HV del material obtenida a partir de la medida de las diagonales.

Debido a la dispersión, es siempre necesario llevar a cabo un número variado de penetraciones para determinar la microdureza de los productos sinterizados. Hay dos tipos de requisitos derivados de esto: uno derivado de consideraciones de tipo estadístico y otro que requiere una rapidez aceptable en términos de la industria ensayística.

El método seleccionado exige al menos siete ensayos con marcas aceptables, por lo que se realizarán diez marcas en cada probeta y los dos valores más bajos serán desechados. La carga aplicada durante 30 segundos será de 100 gramos.

Se comenzará con la parte más externa de la muestra y se irá descendiendo en sentido longitudinal de manera que, una vez realizados los diez ensayos, se haya recorrido toda la superficie.

El proceso de ensayo de la microdureza del material se completa con un estudio estadístico de los resultados obtenidos durante las diferentes mediciones, que consiste en, como se ha señalado previamente, tomar diez medidas de cada una de las muestras (en el caso de las bicapas se tomarán diez medidas de cada una de las capas), eliminando las dos medidas menores, y a partir de las ocho restantes realizar el cálculo de la media, la varianza y la desviación típica. Al valor obtenido como media aritmética se le suma y resta la desviación típica y de esta manera se obtendrá la desviación superior e inferior.

Para realizar estos ensayos de microdureza se ha utilizado un microdurómetro Matsuzama Micro Hardness Tester MXT 70, disponible en el laboratorio.



Equipo microdurómetro

4.6.2 - ENSAYO DE MACRODUREZA

La dureza es una propiedad mecánica de los materiales consistente en la dificultad que existe para rayar o crear marcas en la superficie mediante micropenetración de una punta (penetrabilidad).

En metalurgia, la dureza se mide utilizando un durómetro para el ensayo de penetración. Dependiendo del tipo de punta empleada y del rango de cargas aplicadas, existen diferentes escalas, adecuadas para distintos rangos de dureza.

El interés de la determinación de la dureza en los aceros estriba en la correlación existente entre la dureza y la resistencia mecánica, siendo un método de ensayo más económico y rápido que el ensayo de tracción, por lo que su uso está muy extendido.

4.6.2.1 - Descripción del ensayo de macrodureza

El método usado para medir la macrodureza de las probetas ha sido el Método Vickers.

La decisión de utilizar este método se debe a que el ensayo Brinell cuando se trata con durezas superiores a 400 HB no arroja resultados convincentes y, para durezas por encima de 600 HB, es completamente inaplicable.

El método Vickers trata de 1925 y el nombre se lo debe a la casa constructora del primer durómetro de este tipo, y no a sus inventores (los ingleses Smith y Sandland).

La bolita de acero del ensayo Brinell se sustituyó aquí por una pirámide cuadrangular de diamante. De esta forma se consigue una mayor penetración a la vez que la posibilidad de medir materiales más duros debido a la dureza del diamante.

La pirámide se construye de forma que sus caras opuestas formen un ángulo de 136° . Al ser un ángulo obtuso, la profundidad de la huella es relativamente pequeña.

La huella generada es mucho más fácil y cómoda de medir y, sobretodo, más precisa que con la bola. El tiempo de actuación de la carga es de 15 a 30 segundos.

El número de dureza Vickers se define por la siguiente relación:

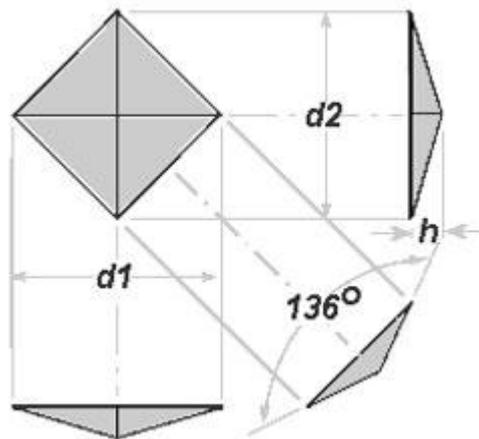
$$HV = P/S \text{ (kp/mm}^2\text{)}$$

, donde P es la carga aplicada y S la superficie de la huella.

La superficie de la huella se determina en función de sus diagonales d_1 y d_2 :

$$S = d^2/1,8544$$

$$d = (d_1 + d_2)/2$$



Las cifras de dureza son independientes de las cargas, que varían de 1 a 150 kp, ya que las impresiones que deja en el material la pirámide son todas semejantes, pero con distintas profundidades.

Para la ejecución de este ensayo se ha seguido la norma UNE 7054.

En este ensayo se ha utilizado un durómetro, y para la posterior medida de las diagonales de la huella se ha utilizado un microscopio óptico y el programa Buehler Ominet 9.0 el cual, mediante técnicas de análisis de imagen, permite obtener el valor de dichas diagonales.



Durómetro

4.6.2.2 - Desarrollo del proceso experimental

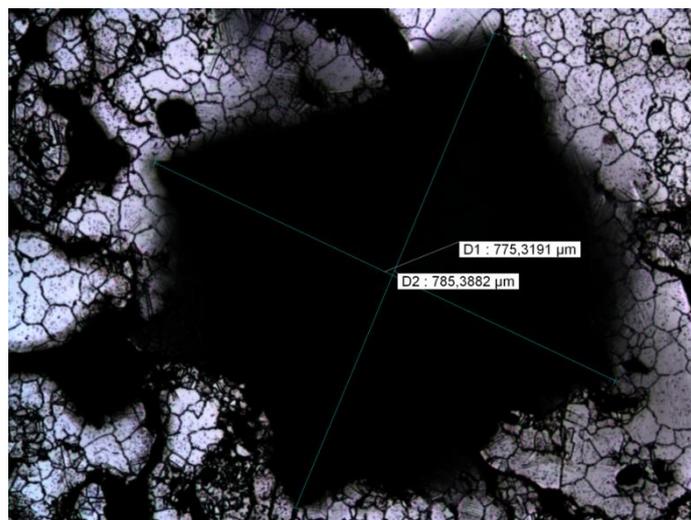
Las cargas varían de 1 a 150 kp: las más habituales son 1, 5, 10, 30, 100 y 150 kp.

El número de dureza Vickers se calcula en función de la carga P y de la superficie de la huella, según la expresión siguiente:

$$HV = 1,8544 \cdot P/d^2 \text{ (kp/mm}^2\text{)}$$

, donde d es la superficie de las diagonales de la huella.

En este estudio se ha empleado una carga de 31,25 kg y un tiempo de 30 segundos de actuación de la misma; se han realizado tres huellas en cada muestra del material; la medida de las diagonales de las huellas se ha realizado mediante análisis de imagen.



Ejemplo de captura de pantalla de una probeta para la determinación de distancia entre diagonales mediante análisis de imagen



4.7 - COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO

Con el objeto de estudiar el comportamiento tribológico de los materiales sinterizados, se van a realizar diferentes ensayos con diversas condiciones de lubricación, con el objetivo de ver qué diferencias hay en el comportamiento de las distintas muestras teniendo en cuenta variaciones en su coeficiente de fricción y penetración.

Los ensayos de desgaste que se van a realizar son los siguientes: desgaste seco, desgaste con lubricación discontinua y desgaste con lubricación interna, combinado este último con un ensayo de permeabilidad. Para todos ellos se usará una máquina específica disponible en el laboratorio denominada tribómetro. Todos los ensayos están basados en el ensayo de desgaste seco, descrito a continuación con más profundidad. A los ensayos de desgaste con lubricación discontinua y desgaste con lubricación interna se les añadirán unas particularidades descritas más adelante.

4.7.1 - ENSAYO DE DESGASTE SECO

El control del desgaste y la fricción de piezas móviles pertenecientes a máquinas es una cuestión muy importante a la que se ha de enfrentar la industria. Es importante disponer de datos procedentes de diferentes análisis obtenidos durante años para distintas condiciones de humedad, temperatura y/o presencia de lubricantes. Los campos de aplicación de estos ensayos son, entre otros:

- Nuevos materiales (cerámicos, metales, polímeros)
- Lubricantes y aditivos en sistemas autolubricantes
- Garantía de la calidad

Mediante estos ensayos se busca hacer un estudio de la resistencia al desgaste de los materiales del presente proyecto. El desgaste está íntimamente relacionado con el concepto de fricción, en la medida en que si la fricción fuese nula no existiría desgaste, no siendo la relación recíproca.

Aunque los fenómenos de fricción y desgaste captaron la atención de algunos científicos, no fue hasta a partir de mediados de la década de los sesenta cuando se empezó a desarrollar la ciencia y la tecnología de las superficies en contacto con movimiento relativo, la tribología. Término que procede de la palabra griega “tribos”, que significa “fricción”, y “logos”, que significa “tratado”. La traducción literal de la palabra podría ser la ciencia del rozamiento. En la actualidad la tribología se considera una ciencia interdisciplinaria, fundamental para el avance industrial eficiente y rentable.



Se logrará una mayor productividad de los equipos y maquinaria si se logra reducir al máximo la fricción, ya que de esta manera se eliminará el desgaste. Cuando dos superficies en contacto deslizan una sobre la otra, una de ellas o ambas sufrirán desgaste. En este punto cobra mucha importancia la lubricación, que también está íntimamente relacionada con el desgaste y la fricción. Dicho todo esto, se concluye que la tribología es una ciencia que se centra en el estudio de tres fenómenos: la fricción entre dos cuerpos en movimiento relativo, el desgaste como efecto natural de este fenómeno, y la lubricación como un medio para evitar el desgaste.

El desgaste por deslizamiento es aquel que se produce cuando dos superficies sólidas deslizan una sobre otra. En la mayor parte de las aplicaciones prácticas, las superficies deslizantes están lubricadas, y el desgaste que se produce es definido como desgaste lubricado. Esto se presenta cuando se mueven a distinta velocidad capas contiguas de un fluido. Las fuerzas que se originan dependerán de la velocidad relativa entre capas, pero también de la viscosidad del fluido. Sin embargo, en algunas aplicaciones de ingeniería y en muchas investigaciones a escala de laboratorio, las superficies se deslizan al aire, sin lubricante. El desgaste resultante se denomina “desgaste seco”, aunque con frecuencia tiene lugar en aire ambiental con humedad apreciable. En este caso dos superficies están en contacto, y la fuerza de rozamiento será opuesta al movimiento. Este fenómeno denominado “desgaste seco” será el que se estudiará a continuación.

Para poder explicar mejor el desarrollo de estos ensayos, se desarrollará de manera breve la explicación del fenómeno del rozamiento y el desgaste para, después, a la hora de explicar las diferentes fases del ensayo, se sepa el porqué de todas ellas.

El rozamiento es el efecto que proviene de la aplicación de fuerzas tangenciales entre dos superficies sólidas en contacto, cuando permanecen unidas por la existencia de esfuerzos normales a las mismas. En relación con el rozamiento, aparecen los conceptos de fuerza de rozamiento y coeficiente de rozamiento.

Cuando a dos superficies se les aplica una fuerza tangencial, aparecerá otra fuerza con la dirección del movimiento o de la tendencia al movimiento, pero de sentido contrario. Ésta será la que conocemos como fuerza de rozamiento. La fuerza tangencial aplicada variará con continuidad desde cero hasta un valor suficiente para que exista el movimiento relativo de las dos superficies. Cuando esta fuerza es nula, no existirá tampoco fuerza de rozamiento, y al crecer, la fuerza de rozamiento deberá ir creciendo, igualándose a ella, impidiendo así que exista movimiento relativo. Así las cosas, las superficies están en equilibrio y todas las fuerzas deben satisfacer las ecuaciones de equilibrio.

Pero cuando la fuerza aplicada llega a un valor tal que aparece el movimiento relativo en dirección y sentido de la fuerza, en ese instante, la fuerza de rozamiento disminuye ligeramente a un valor algo inferior y después se mantiene constante durante el movimiento, disminuyendo aún más si aumenta la velocidad. La zona hasta el punto en que empieza el movimiento se conoce como rozamiento estático, en la que la fuerza de rozamiento varía entre cero y el valor máximo verificándose:



$$F = F_{roz} \leq \mu_e \cdot N$$

, donde

F_{roz}: Fuerza de rozamiento

F: Fuerza tangencial aplicada

μ_e: Coeficiente de rozamiento estático

N: Fuerza normal, que mantiene las dos superficies juntas y que es la resultante de las infinitas reacciones que aparecen en la superficie de contacto de los dos cuerpos.

Aquí la fuerza tangencial aplicada y la fuerza de rozamiento han de igualarse, ya que no existe movimiento, y se deben cumplir las ecuaciones de equilibrio. El producto $\mu_e \cdot N$ es el valor máximo de la fuerza de rozamiento, el momento en que empieza el movimiento.

Una vez que se produce el deslizamiento se dan unas condiciones de rozamiento cinético o dinámico, que entraña una fuerza de rozamiento algo menor que la fuerza máxima de rozamiento estático. En estas condiciones se verifica:

$$F \geq F_{roz} = \mu_c \cdot N$$

, donde

F_{roz}: Fuerza de rozamiento

F: Fuerza tangencial aplicada

μ_c: Coeficiente de rozamiento dinámico

N: Fuerza normal, que mantiene las dos superficies juntas, y que es la resultante de las infinitas reacciones que aparecen en la superficie de contacto de los dos cuerpos.

En este caso, como ya existe movimiento, no habrá equilibrio, por lo tanto la fuerza aplicada será mayor que la de rozamiento. Si se aumenta la velocidad de deslizamiento, el coeficiente de rozamiento dinámico sustituirá ligeramente.

El coeficiente de rozamiento, o coeficiente de fricción, no es una propiedad intrínseca del material, sino que depende de otros factores, como la humedad, temperatura, velocidad de desplazamiento, presión de contacto, tipo de lubricante, acabado superficial, etc. Se puede definir el coeficiente estático de fricción como la relación entre la fuerza necesaria para iniciar el movimiento y la reacción que existe entre los elementos que van a tener movimiento relativo, y como coeficiente dinámico de fricción, la relación entre la fuerza necesaria para mantener el movimiento y la anterior reacción.

En los ensayos de desgaste seco, dos de los parámetros con los que se trabajará son la fuerza y el coeficiente de fricción, de ahí la importancia de la anterior explicación.



El desgaste consiste en la desaparición de material de la superficie de un cuerpo como consecuencia de un movimiento relativo de otro cuerpo. Es un proceso en el cual las capas superficiales de un sólido se rompen o se desprenden de la superficie. Al igual que la fricción, el desgaste no es solamente una propiedad del material, sino que es una respuesta general del sistema. Diferentes estudios han demostrado que el 75% de los fallos mecánicos se deben al desgaste de las superficies en rozamiento. Se deduce fácilmente que para aumentar la vida útil de un equipo se debe disminuir el desgaste al mínimo posible. Entre los tipos de desgaste que generalmente se pueden encontrar, se tienen:

- *Desgaste por fatiga:* Surge por concentración de tensiones mayores a las que puede soportar el material, incluyendo dislocaciones, formación de cavidades y grietas.
- *Desgaste abrasivo:* Es el daño provocado por la acción de partículas sólidas presentes en la zona del rozamiento.
- *Desgaste por erosión:* Es producido por una corriente de partículas abrasivas, muy común en turbinas de gas, tubos de escape y motores.
- *Desgaste por corrosión:* Originado por la influencia del medio ambiente, principalmente la humedad, seguido de la eliminación por abrasión, fatiga o erosión de la capa del compuesto formado. A este grupo pertenece el desgaste por oxidación, ocasionado principalmente por la acción del oxígeno atmosférico o disuelto en el lubricante, sobre las superficies en movimiento.
- *Desgaste por frotación:* Aquí se conjugan las cuatro formas de desgaste. En este caso los cuerpos en movimiento tienen movimientos de oscilación de una amplitud menor de 100 μm . Generalmente se presenta en sistemas ensamblados.
- *Desgaste adhesivo:* Es el proceso por el cual se transfiere material de una a otra superficie durante su movimiento relativo.

4.7.1.1 - Descripción del ensayo

El ensayo de resistencia al desgaste tiene una relevancia importante debido a que puede determinar la vida útil de piezas sometidas a desgaste y realizar comparativas entre la calidad de las capas finas o recubrimientos.

En los laboratorios de investigación se trata de averiguar las aplicaciones prácticas, de manera que se puedan obtener datos de diseño útiles en cuanto a tasas de desgaste y coeficientes de fricción. Para ello es sumamente importante el control y la medida de todas las variables que puedan tener influencia sobre el desgaste.

Para estudiar los efectos de desgaste seco se utiliza un equipo especial llamado tribómetro.

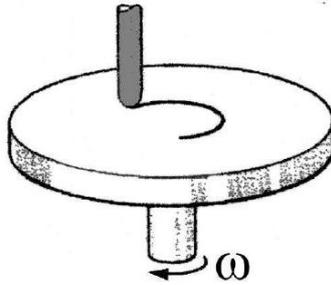


Tribómetro

El tribómetro utilizado es el modelo MT/30/NI y su fabricante es Microtest. El equipo de ensayo consiste en un banco con una sección de carga, una unidad de control o adquisición y un ordenador en el cual se ha instalado el software MT4002, específico para esta máquina.



El ensayo de desgaste seco se ha efectuado con un equipo pin-on-disk, que se recoge en la norma ASTM G 99-05. La técnica consiste en aplicar una carga conocida sobre un pin o bola, colocado perpendicularmente a un disco sobre el cual se colocará el material a ensayar. Con esta configuración el pin está en contacto permanente con la muestra y permanece fijo, mientras que el disco gira, provocando un deslizamiento relativo en el área de contacto entre ambos elementos, formando una trayectoria circular en la superficie de la muestra, siendo ésta objeto de estudio. Los tribómetros pin-on-disk tienen una amplia importancia en la investigación y simulación de procesos de desgaste bajo condiciones de deslizamiento, pudiendo funcionar en condiciones de fricción seca, sin lubricante, o en condiciones de fricción límite con una capa de lubricante líquido, como se re describirá más adelante, puesto que esta máquina se ha utilizado para más ensayos de este proyecto. De esta manera se pueden ejecutar ensayos tanto para materiales como para lubricantes.



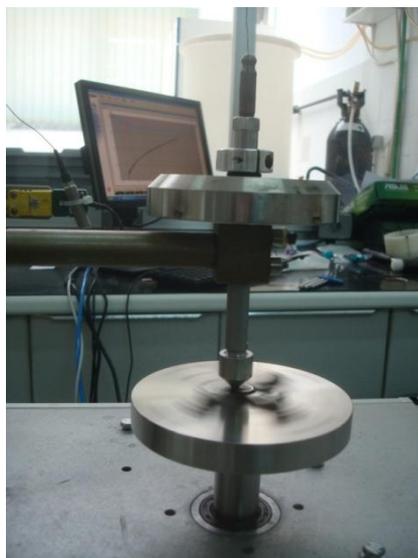
Para esta técnica de ensayo los parámetros de ejecución que marca la norma son los siguientes:

- *Carga sobre el pin:* 5 o 10 newton
- *Velocidad lineal de deslizamiento:* 0,1 m/s
- *Distancia:* 250 o 500 metros
- *Diámetro del pin o la bola:* 6 milímetros

El equipo necesario con que debe contar el banco con la sección de carga para este método consiste en el disco giratorio sobre el que se colocan los materiales bajo ensayo, un brazo rígido y un porta bines acoplado a él.

El pin o la bola estará cargado por medio de unos pesos muertos de 5 o de 10 Newton. Operando de esta manera, mediante los pesos muerto, se consigue la fuerza normal estable y conocida durante todo el ensayo.

El pin o bola se encuentra alojada en el porta pines, y éste está montado en un brazo rígido, diseñado como un transductor extensométrico de fuerza sin rozamiento. Para evitar posibles efectos de fricción parásita, el brazo de alta rigidez asegura prácticamente el contacto puntual y, de esta manera, una posición altamente estable en todo el recorrido del estudio de fricción.



Disco giratorio en pleno proceso de desgaste

El coeficiente de rozamiento se obtiene durante el ensayo mediante la medida de fuerza de rozamiento obtenida a partir de la deflexión del brazo elástico. Para tal fin se utilizan unas bandas extensiométricas pegadas en el cuerpo elástico del brazo que convierten esta deflexión en una señal eléctrica que, tratada adecuadamente, nos permite la lectura directa de la fuerza de rozamiento. Con la medida de la fuerza de rozamiento y con la fuerza normal que se ha aplicado, el sistema calcula y registra el coeficiente de rozamiento en cada instante.

La rotación del disco del tribómetro se controla gracias a un servo motor variable entre 0 y 500 rpm.

El sistema está conectado a un ordenador en el que se ha instalado un software específico, como ya se señaló anteriormente, que permitirá al usuario controlar parámetros tales como la velocidad, la frecuencia, la presión en el contacto de los elementos con movimiento relativo, el tiempo y el radio de la trayectoria circular de fricción.

El desgaste puede ser evaluado mediante los incrementos del ángulo del brazo durante el ensayo, gracias a un sensor inductivo de desplazamiento (Linear Variable Displacement Transducer). La relación geométrica entre el brazo y el soporte donde se aloja el LVDT da como resultado la medida del desgaste total durante el ensayo.

Durante el ensayo la fuerza normal, la temperatura, la penetración en las probetas, el coeficiente de rozamiento y otros parámetros adicionales se muestran y se registran en tiempo real a través del monitor del ordenador.

Las principales características y parámetros del tribómetro para la técnica pin-on-disk son:

- **Velocidad de rotación:** entre 0 y 500 rpm.
- **Velocidad lineal:** para determinadas velocidades de rotación del disco, con distintas variaciones del radio de la trayectoria, conseguiremos variar la velocidad.

$$v_{lineal} = \omega \cdot R$$

Para este propósito, el equipo está provisto de un micrómetro que permite mover al alojamiento del pin hasta el radio deseado.

La velocidad lineal máxima se obtiene para 500 rpm y 50 mm de radio y es aproximadamente 2,5 m/s.

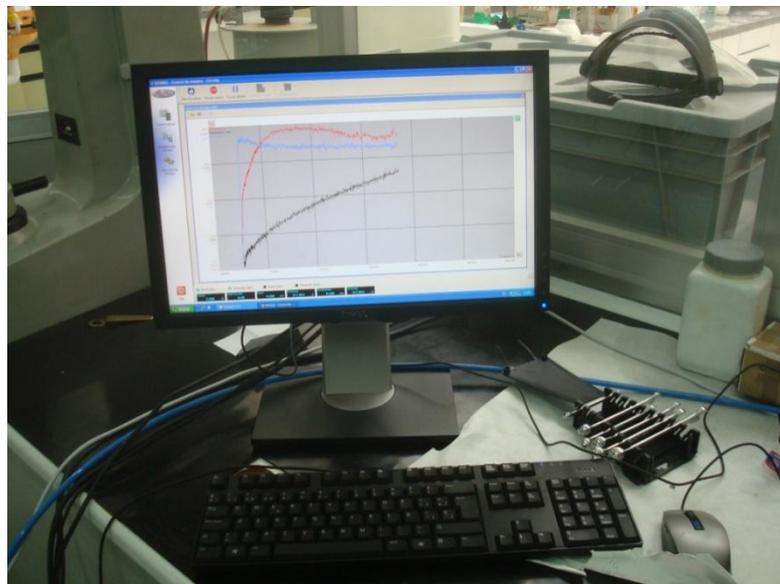
- **Cargas (pesos muertos):** 5 o 10 newton.
- **Pin:** mediante bolas o pin. Se pueden montar bolas de diferentes diámetros. Se ha ensayado con una bola de diámetro 6 milímetros de alúmina.
- **Disco:** el disco donde va sujeta la probeta tiene una medida estándar de 100 milímetros. En él se pueden fijar probetas de hasta 60 milímetros.

- **Probeta:** el tamaño máximo de una probeta circular será de 60 milímetros de diámetro y 15 milímetros de altura.
- **Radio de la trayectoria de desgaste:** podrá variar entre 0 y 50 milímetros.
- **Ambiente:** una cubierta de policarbonato rodea al área de ensayo, permitiendo un apropiado control de las condiciones ambientales de trabajo.
- **Almacenamiento de datos y cálculos:** el software que incluye el sistema se llama MT4002, y sirve para la realización de ensayos, el registro de parámetros y el tratamiento de datos.

Lo primero que es necesario realizar antes de llevar a cabo el ensayo es calibrar y poner a punto el tribómetro: éste ha de estar situado sobre una mesa en particular, cuyas características permiten disminuir las vibraciones del entorno mientras se realizan las pruebas, y cada vez que comience un ensayo se debe comprobar que la mesa está perfectamente nivelada.

El equipo está programado para detener el motor una vez que el ensayo ha llegado a su fin al llegar al recorrido marcado. Este valor es determinado y programado previamente por el usuario.

Los resultados quedan registrados automáticamente a través del software instalado en el ordenador -mencionado anteriormente. El equipo permite analizar probetas de diferentes tamaños y geometrías.



Software de recogida de datos y graficación de resultados

4.7.1.2 - Fases del ensayo

A continuación se procede a describir las diferentes fases por las que se ha pasado para la realización del ensayo:

1. **Selección de materiales:** En primer lugar se ha decidido cuáles van a ser los materiales a los que se les someta a los ensayos de desgaste seco.
2. **Preparación de las muestras:** Previamente se han desbastado las muestras en la cara en la que se va a realizar el ensayo con lijas desde P180 a P1000. Posteriormente se someten a un baño de ultrasonidos con el objetivo de limpiar la superficie, y por último se colocan de manera correcta en el tribómetro, haciendo uso de las mordazas o garras con las que cuenta el disco.
3. **Selección de los parámetros:** Se seleccionan el radio de giro, la carga aplicada, velocidad de giro, distancia recorrida y tipo de pin o bola.

El radio de giro se elige en función de las probetas, usando el radio más grande posible. En este caso se usará un radio de 4 milímetros.

La velocidad de giro se determina a través del radio de giro y de la velocidad lineal de ensayo que se fija en 0,1 m/s. La velocidad angular (ω) se puede determinar mediante la expresión $\omega = v/R$, obteniendo:

$$\omega = 0,1/0,004$$

$$\omega = 25 \text{ rad/s}$$

$$\omega = 238 \text{ rpm}$$

La carga aplicada será de 10 o de 5 newton.

La distancia recorrida sobre la trayectoria circular será de 500 metros.

Pin de 6 milímetros de alúmina (Al2O3)

4. **Colocación de las muestras de material en el tribómetro:** Se debe colocar la muestra en las mordazas de disco portamuestras. Las muestras se deben colocar centradas.
5. **Configuración del tribómetro:** Una vez realizado todo lo anterior, se enciende el tribómetro y se ejecuta el programa MT4002, en el que se introducirán todos los parámetros de ensayo: el radio de giro, la velocidad, la distancia a recorrer, la carga nominal, así como datos de identificación, tales como la fecha, el nombre del usuario... A continuación se pone el brazo del tribómetro a nivel, de manera que esté totalmente horizontal en la posición de apoyo con la muestra. Se pone en el vástago portapesas los pesos que requiere el ensayo (5 o 10 newton). En ese momento se comprueba que el disco donde está la muestra está también nivelado.



6. **Puesta en marcha del ensayo:** Se debe proceder a iniciar el ensayo mediante el módulo de control de ensayos del software. Se debe seleccionar el método de desgaste circular. Hay que poner todos los parámetros de medida a cero para que no se tengan como resultado medidas falseadas. El ensayo se detiene cuando se han recorrido 500 metros. Entonces para automáticamente y en la pantalla aparece un mensaje de fin de ensayo.
7. **Registro de datos:** Se registra la medida del coeficiente de rozamiento, la carga normal aplicada, la velocidad de giro, la distancia recorrida y el tiempo de ensayo. Se registra gráficas y datos, para su posterior tratamiento.
8. **Limpieza:** Una vez finalizado el ensayo se procede a recoger los polvos que se hayan producido como consecuencia del ensayo, para no influir al ensayo que se ponga a continuación.
9. **Tratamiento de datos:** El software de tratamiento de datos permite recuperar los ficheros de datos generados durante el ensayo y visualizarlos en la pantalla, así como exportarlos a diferentes programas, tales como Microsoft Excel y OriginPro, en los que se podrán crear diferentes gráficas comparando las variables que se vayan a tener en cuenta para su estudio.

4.7.1.3 - Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos una vez realizados los ensayos de desgaste seco son analizados mediante gráficos comparativos en los que se pueden representar aquellas variables que más interesen. De esta manera se puede estudiar la influencia de la composición, la carga y la presión de compactación.

4.7.2 - ENSAYO DE DESGASTE CON LUBRICACIÓN DISCONTINUA

Como se ha señalado anteriormente, este ensayo es muy similar al de desgaste seco: se realiza con el mismo equipo y los parámetros de estudio son los mismos. La salvedad en este ensayo es que también se evalúa la influencia de la lubricación sobre la muestra. Para ello el ensayo se realizará con la ayuda de un difusor que lubricará la muestra durante todo el ensayo.

4.7.2.1 - Preparación de la disolución de Carboximetilcelulosa

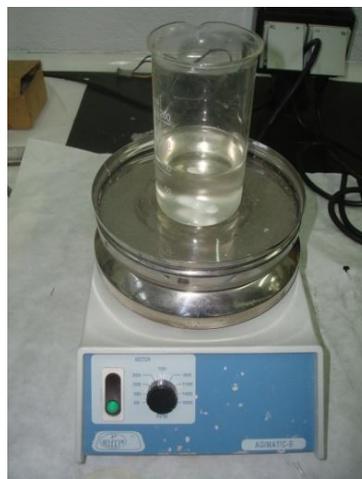
Como líquido de impregnación se va a utilizar una disolución de carboximetilcelulosa al 1%, usando como disolvente agua destilada y como soluto Carboximetilcelulosa Sal Sódica media viscosidad (RFE, USP, BP, Ph. Eur.) PRS-CODEX.

Para ello se ha de pesar en una báscula digital la cantidad de soluto, con la siguiente proporción: por cada gramo de soluto se verterán 99 mililitros de disolvente, en este caso agua destilada, con el objetivo de preparar correctamente la disolución al 1%.



Báscula digital

Una vez vertido el disolvente, se introduce en el matraz un agitador imantado y se coloca en un equipo de agitación con el objetivo de homogeneizar la disolución.



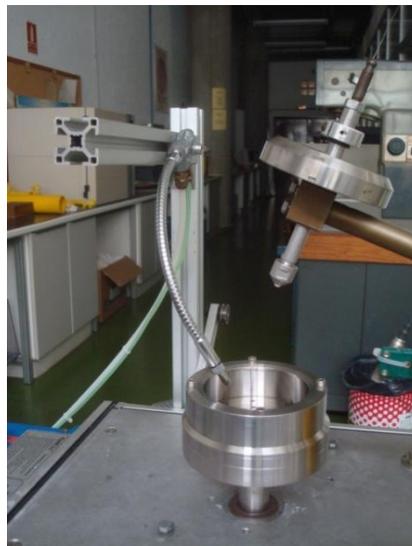
Equipo de agitación

4.7.2.2 - Descripción del ensayo

Se procede de la misma manera que se indicó en el ensayo de desgaste seco, pero la diferencia que hay entre ese ensayo y este es la existencia de una válvula lubricadora y una válvula difusora presentes en el difusor, el cual irá conectado a un depósito donde se almacena el lubricante, que será vertido sobre la muestra durante el ensayo. Utilizando el mismo software, se introducirán los parámetros deseados:

- Tiempo de lubricación: 3 segundos
- Tiempo de difusión: 5 segundos

La mecánica del ensayo y la obtención de los datos es la misma en el ensayo de desgaste seco.



Difusor



Depósito para el lubricante

4.7.3 - ENSAYO DE DESGASTE CON LUBRICACIÓN INTERNA

El ensayo de desgaste con lubricación interna es idéntico al de desgaste seco, con la peculiaridad de que se va a estudiar la influencia de la lubricación interna en el coeficiente de fricción y en la penetración. Para ello, se van a lubricar las muestras internamente con la ayuda de un equipo de impregnación al vacío llamado “Epovac”. La preparación del lubricante que se va a utilizar, así como el método de impregnación y las características del equipo utilizado se describe a continuación.

4.7.3.1 - Preparación de la disolución de Carboximetilcelulosa

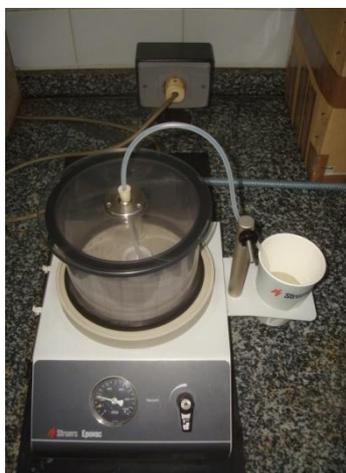
Como se ha señalado, se va a utilizar como líquido de impregnación una disolución de carboximetilcelulosa, usando como disolvente agua destilada y como soluto Carboximetilcelulosa Sal Sódica media viscosidad (RFE, USP, BP, Ph. Eur.) PRS-CODEX.

La disolución se va a preparar de la misma manera que se preparó en el ensayo de desgaste con lubricación discontinua, pero esta vez la disolución de carboximetilcelulosa tendrá diferentes concentraciones: 2%, 1% y 0.5%. Se procede, por lo tanto, y se pesa en una báscula digital la cantidad de soluto, con la siguiente proporción: por cada 2 gramos de soluto se verterán 98 mililitros de disolvente, en este caso agua destilada, con el objetivo de preparar correctamente la disolución al 2%. Para preparar las disoluciones al 1% y al 0.5% se actuará de la misma manera, empleando 1 gramo de soluto por 99 mililitros de disolvente y 0.5 gramos de soluto por 99.5 mililitros de disolvente, respectivamente. De la misma manera, una vez vertido el disolvente, se introduce en el matraz un agitador imantado y se coloca en un equipo de agitación con el fin de homogeneizar la disolución.

4.7.3.2 - Impregnación en la Epovac

Descripción de la Epovac

Una vez que se ha preparado la disolución de carboximetilcelulosa, se procede a la impregnación de las muestras. Para ello se va a utilizar la unidad de impregnación al vacío Struers Epovac, disponible en el laboratorio.



Equipo de impregnación Epovac



La Epovac es un aparato de impregnación al vacío, especialmente diseñado para la incrustación y la impregnación en materiales porosos. El aparato consta de una carcasa robusta de metal compacto con una cámara de incrustación cilíndrica de PVC. El líquido de impregnación se suministra a través de un tubo desechable. El tubo o capilar es conducido a través de una articulación de rótula y, debido a ello, es muy fácil distribuir el líquido a los moldes individuales, en los cuales se introducirán las muestras.

Utilizando moldes de 25 milímetros de diámetro se pueden introducir 9 muestras al mismo tiempo en la Epovac. Como la cámara de incrustación es grande (el diámetro es de 134 mm, mientras que la altura es de 100 mm), también se pueden introducir muestras grandes para ser impregnadas e incrustadas.

La parte inferior de la cámara de incrustación está hecha de polipropileno, con el fin de que el líquido de impregnación que se pueda derramar no se quede pegado.

La unidad de impregnación al vacío Epovac se conecta a una bomba de vacío externa.

Instalación y conexión de la Epovac

La unidad de impregnación al vacío Epovac no requiere ser colocada en ningún lugar en especial. Sin embargo, el aparato no debe ser colocado en un lugar en el que esté expuesto directamente a la luz solar, ya que la cámara de vacío de PVC es sensible a la radiación de rayos ultravioletas. Es, asimismo, recomendable que el aparato sea utilizado en una zona ampliamente ventilada, o donde haya por ejemplo una campana extractora de humos.

Conexión:

En primer lugar se ha de conectar el aparato a una bomba de vacío por medio de la manguera, suministrada con el propio aparato:

- Se monta el tubo de conexión con el conector en la parte posterior del aparato.
- Se monta la abrazadera de la manguera y se aprieta.
- Se acorta la manguera a una longitud adecuada.
- Se monta la manguera en la bomba de vacío.

Hay que ser especialmente cuidadoso y asegurarse de que la manguera no tenga curvas cerradas, ya que podría retrasar la aplicación del líquido de impregnación. Si se necesita una manguera más larga se recomienda elegir una cuyo diámetro interior sea más grande, con el objetivo de asegurar un flujo suficiente.



Impregnación en la Epovac

Preparación de la impregnación:

Se coloca la muestra limpia y seca en un molde adecuado. Si hay más de una muestra, se colocan simétricamente alrededor del centro de la cámara de incrustación.

Se comprueba antes de la operación que la cámara de vacío y la tapa estén sin fisuras, ya que de ser así podrían hacer implosión al ser expuestas al vacío. También se ha de comprobar que los anillos de sellado estén limpios y en buen estado.

A continuación se monta la cámara de vacío y la tapa.

Se introduce el capilar de impregnación a través del tapón de goma y se presiona bien. Se pone el mismo a través de la abrazadera de la manguera y se coloca el tapón de goma en la junta de pivote de la tapa.

Posteriormente se aprieta la abrazadera de la manguera y se abre la llave de conexión a la bomba de vacío. Se ajusta la válvula de vacío al máximo, y el vacío real se puede leer en el medidor de vacío.

Hay que señalar que antes de la impregnación, las muestras han sido previamente preparadas, siendo desbastada la cara de la probeta sobre la cual se va a realizar el ensayo usando lijas desde P180 a P1000. Asimismo, las probetas deben ser limpiadas, siendo sometidas a un baño de ultrasonidos, y desengrasadas.

Impregnación:

Cuando las muestras han sido expuestas al vacío durante un tiempo apropiado (a partir de un par de minutos para muestras no muy porosas y hasta media hora para muestras muy porosas) la impregnación puede comenzar. En el caso del presente proyecto, ha resultado de interés el estudio de aceros con una alta porosidad, por lo que las probetas serán expuestas al vacío durante un tiempo de treinta minutos.

Se coloca el vaso con el líquido de impregnación premezclado en el soporte del mismo. Se comprueba que el tubo capilar está cerca del fondo del vaso, o el aire podría ser aspirado hacia el sistema y salpicar la cámara de vacío.

Se gira la manguera para que apunte hacia uno de los moldes donde se han colocado las muestras y se abre lentamente la abrazadera de la manguera hasta que el líquido de impregnación fluya en un flujo adecuado.

Cuando la muestra está cubierta de líquido de impregnación se cierra la abrazadera de la manguera y de esta manera disminuye el flujo hasta cerrarlo. Entonces se mueve la manguera al siguiente molde y de nuevo se abre la abrazadera de la manguera. Se procede de esta manera hasta que todos los moldes se hayan llenado del líquido de impregnación.



Por último se cierra la abrazadera de la manguera y se gira la válvula de vacío hasta el mínimo. Posteriormente se retira la tapa de la cámara de vacío y se dejan las muestras durante unos instantes para que absorban el líquido de impregnación.

4.7.3.3 – Ensayo de permeabilidad

Con el objetivo de comprobar la absorción que hace del líquido lubricante la muestra, se va a pesar la misma antes de introducirla en el equipo de impregnación, así como posteriormente, y la diferencia entre ambos pesos será la cantidad de lubricante que ha absorbido la probeta.

Finalmente, las muestras están preparadas para realizar ensayos sobre ellas.



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

PROYECTO FIN DE CARRERA



ANÁLISIS DE RESULTADOS



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

PROYECTO FIN DE CARRERA

5 - ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 - ESTUDIO DE POROSIDAD

A continuación se recogen los resultados obtenidos al realizar el estudio de porosidad, tomando como magnitudes más importantes a tener en cuenta el porcentaje de porosidad superficial y el área de los poros. Adicionalmente en el estudio también se han evaluado otras magnitudes como la esfericidad, el perímetro, la población relativa de poros grandes/poros pequeños, etc.

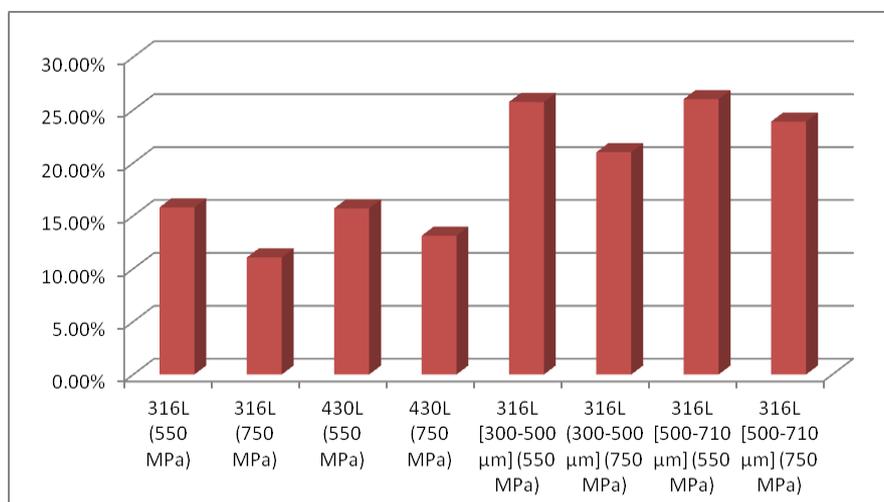
5.1.1 - POROSIDAD SUPERFICIAL

5.1.1.1 - Aceros base

En la tabla adjunta se muestran los resultados de porosidad superficial para los dos aceros base ferríticos y austeníticos. 430L y 316L, compactados a 550 MPa y 750 MPa:

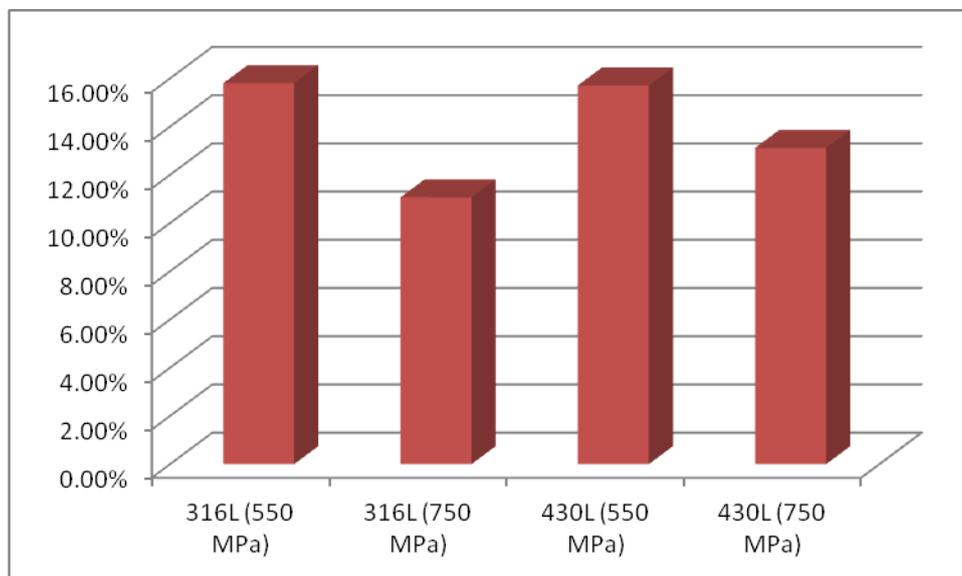
Muestra	Porosidad media (%)	Porosidad mínima (%)	Porosidad máxima (%)	Desviación típica (%)
430L (550 MPa)	15,7111	13,2688	17,7250	1,4081
430L (750 MPa)	13,1191	11,2626	14,9095	1,0951
316L (550 MPa)	15,7993	14,0042	18,9919	1,4696
316L (750 MPa)	11,0682	9,3514	13,0440	1,0728
316L [300-500 μm] (550 MPa)	25,7550	21,6827	33,0750	3,4073
316L [300-500 μm] (750 MPa)	21,0112	14,6389	25,4891	3,5839
316L [500-710 μm] (550 MPa)	26,0302	23,9162	29,0140	1,6380
316L [500-710 μm] (750 MPa)	23,9067	21,7673	26,6616	1,6536

A continuación se exponen en el gráfico los resultados de porosidad superficial para todos los aceros base:

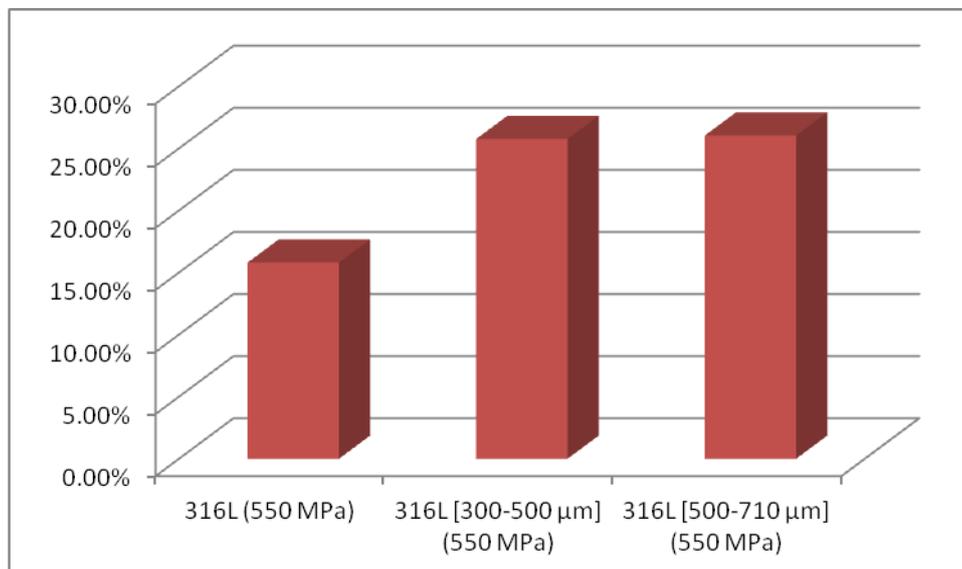


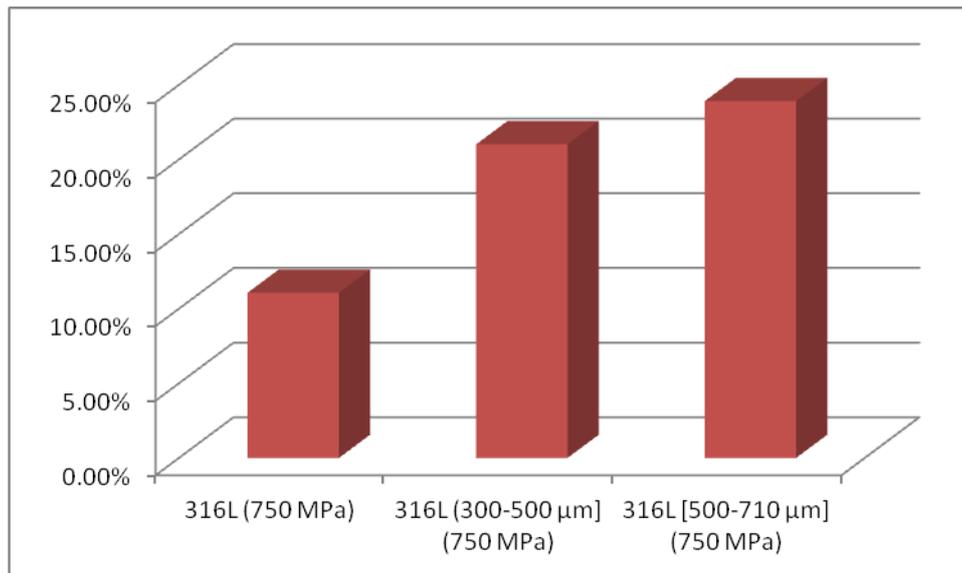
La porosidad superficial de los aceros base evaluada mediante análisis de imagen confirma que los dos aceros austenítico y ferrítico base con tamaño de grano estándar tienen una porosidad media similar cuando son compactados a 550 MPa, mientras que al ser compactados a 750 MPa los resultados difieren, teniendo el acero ferrítico una porosidad superior. Esto puede ser debido a la menor capacidad de compactación de los polvos ferríticos, lo que hace que sea precisamente para la mayor presión de compactación cuando las diferencias son más notables. Para la menor presión de compactación la capacidad de compactado es menor y en este caso la mayor difusión de los polvos ferríticos puede hacer que se compense su menor capacidad de compactación.

En ambos aceros se observa que el uso de una mayor presión de compactación da lugar a una importante reducción de la porosidad superficial, especialmente en el acero base austenítico.



También se va a comparar el acero base 316L con tamaño de grano estándar con los de tamaño de grano más grueso, según la presión de compactación:





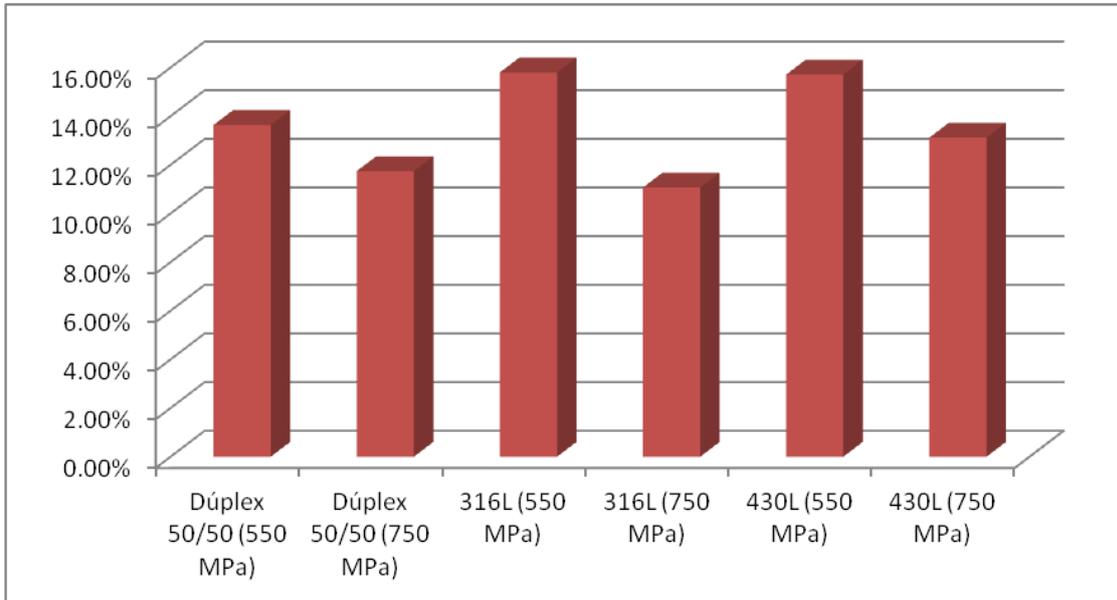
Tal y como era previsible se observa un importante incremento en la porosidad superficial al utilizar en la compactación un tamaño de grano más grueso para el polvo austenítico. Al igual que ocurría en el acero compactado con polvo fino son más porosos los materiales compactados a menor presión de compactación, esto es, a 550 MPa. Como también es lógico la utilización de polvos de mayor tamaño origina un importante incremento de la porosidad superficial siendo este efecto mucho más notable cuando se utilizan mayores presiones de compactación. En definitiva, la probeta más porosa es la fabricada con polvo de tamaño de grano de 500 a 710 micras y compactada a menor presión. Esto hará que sea la probeta sobre la cual se realizarán más ensayos con el objetivo de encontrar una relación entre la porosidad superficial y el desgaste.

5.1.1.2 - Mezclas

A continuación se recogen los resultados de porosidad superficial de las mezclas realizadas a diferente presión de compactación. Se han realizado dos tipos de mezclas distintas. Una de polvo austenítico y ferrítico que denominamos Dúplex 50/50 y otra con mezcla de polvo austeníticos con diferente tamaño de grano que se denomina Mezcla Austenítica.

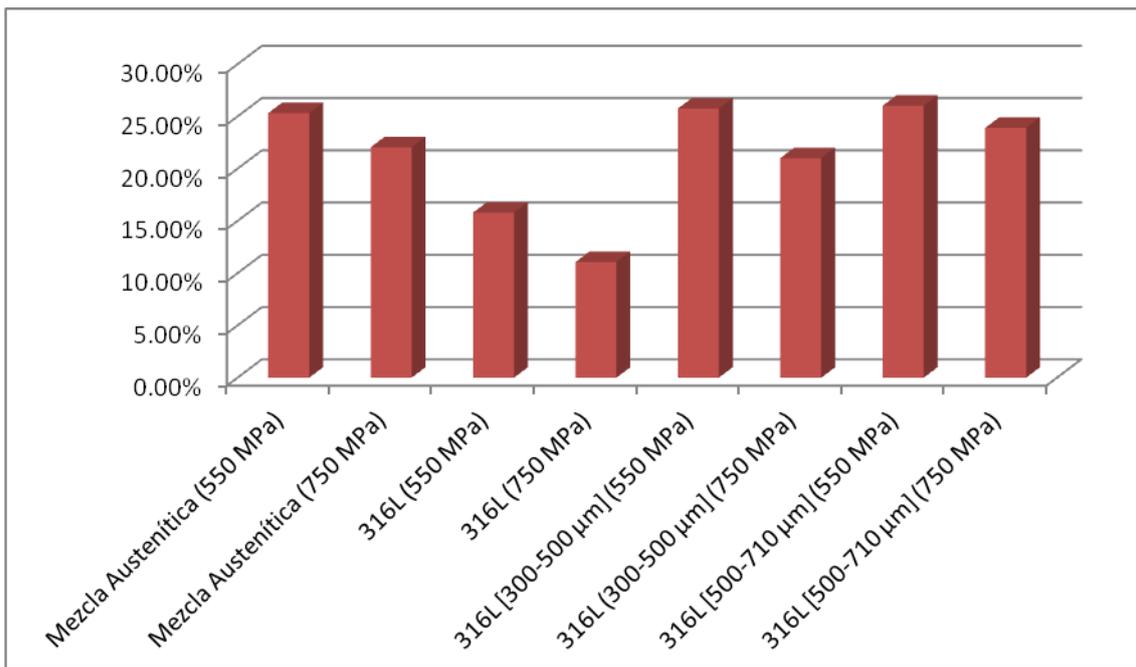
Muestra	Porosidad media (%)	Porosidad mínima (%)	Porosidad máxima (%)	Desviación típica (%)
Dúplex 50/50 (550 MPa)	13,6402	11,3096	16,6649	1,9059
Dúplex 50/50 (750 MPa)	11,7425	8,6006	13,0308	1,4437
Mezcla Austenítica (550 MPa)	25,3261	20,7655	28,5854	2,7024
Mezcla Austenítica (750 MPa)	22,0547	17,9531	24,2633	1,9934

Se adjunta un gráfico comparando la porosidad superficial tanto de los aceros base con tamaño de grano estándar como de los Dúplex 50/50:



El efecto de la presión de compactación es similar al observado en los aceros base. Se observa que a menor presión de compactación, 550 MPa, la porosidad superficial es claramente mayor. En relación con los aceros base se observa que para ambas presiones de compactación la mezcla de aceros Dúplex 50/50 tiene grados de porosidad intermedio entre los dos aceros base. Es inferior a la de los aceros base 430L y ligeramente más alta que la porosidad observada en los aceros base 316L compactados a la misma presión de compactación.

En cuanto a la Mezcla Austenítica, en el gráfico adjunto se va a comparar esta mezcla a las dos presiones de trabajo con el acero base 316L con diferentes tamaños de grano:



Como en casos anteriores, se observa el efecto beneficioso de la utilización de presiones de compactación más elevadas. Para ambas presiones de compactación la porosidad es intermedia entre la registrada para las dos muestras de polvos con diferentes tamaños de grano. Se observa que la Mezcla Austenítica tiene una porosidad muy alta, similar a la de las muestras compactadas a partir de polvo con tamaño de grano grueso, en ambas compactaciones, notándose una gran diferencia (al igual que ocurría en los aceros base) entre las muestras de tamaño de grano estándar y las de polvo con tamaño de grano intermedio y grueso.

5.1.1.3 - Bicapas

Finalmente en este apartado se analiza el compartamiento de las muestras bicapa de acero austenítico y ferrítico mezclados con polvos atomizados por gas y de la bicapa austenítica obtenida a partir de polvo austenítico atomizado por agua con diferente tamaño de grano. Para cada bicapa se analiza la porosidad de cada una de las dos capas de la probeta sinterizada.

Muestra	Capa	Porosidad media (%)	Porosidad mínima (%)	Porosidad máxima (%)	Desviación típica (%)
Bicapa 316L [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa)	316L [$\frac{2}{3}$]	14,8496	13,7884	16,9495	1,4849
	Mezcla 316L [$\frac{1}{3}$]	15,2226	14,8392	15,5504	0,2930
Bicapa 316L [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (550 MPa)	316L [$\frac{1}{2}$]	13,5493	12,2437	14,2610	0,9244
	Mezcla 316L [$\frac{1}{2}$]	15,0199	13,3591	17,1541	1,5851
Bicapa 316L [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (750 MPa)	316L [$\frac{1}{2}$]	10,9007	10,4002	11,4596	0,4345
	Mezcla 316L [$\frac{1}{2}$]	12,0952	10,7115	13,8357	1,3002
Bicapa 430L [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (750 MPa)	430L [$\frac{1}{2}$]	12,9661	11,4841	14,2462	1,1366
	Mezcla 430L [$\frac{1}{2}$]	13,6171	12,0117	14,98	1,4989
Bicapa 430L [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa)	430L [$\frac{2}{3}$]	12,8568	12,0226	13,6716	0,6733
	Mezcla 430L [$\frac{1}{3}$]	13,6245	13,3878	14,0101	0,2750
Bicapa 50/50 [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa)	50/50 [$\frac{2}{3}$]	11,8860	11,2631	12,4109	0,4737
	Mezcla 50/50 [$\frac{1}{3}$]	14,1989	13,0122	15,3832	0,9680
Bicapa Austenítica [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (550 MPa)	316L [300-500 μ m] [$\frac{1}{2}$]	25,6243	24,4309	26,9633	1,0390
	316L [500-710 μ m] [$\frac{1}{2}$]	26,0743	24,3443	28,0946	1,5447

Con respecto a las bicapas compactadas a partir de polvo austenítico puro, se observa claramente el efecto beneficioso de la presión de compactación en la reducción de porosidad. Comparando con el acero base de referencia se observa que las porosidades no coinciden exactamente. En la bicapa 316L [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] compactada a 550 MPa, la porosidad de la capa del acero atomizado por agua es algo menor que la del acero base, al igual que se observa un cambio en la porosidad de la capa del acero atomizado por agua de la bicapa 316L [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] compactada a 750 MPa, puesto que la porosidad superficial es mayor; en el caso de esta bicapa, la porosidad de ambas capas es muy similar. No ocurre lo mismo en la bicapa 316L [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] compactada a 750 MPa, ya que el estudio realizado arroja un resultado similar al de la porosidad superficial del acero base.



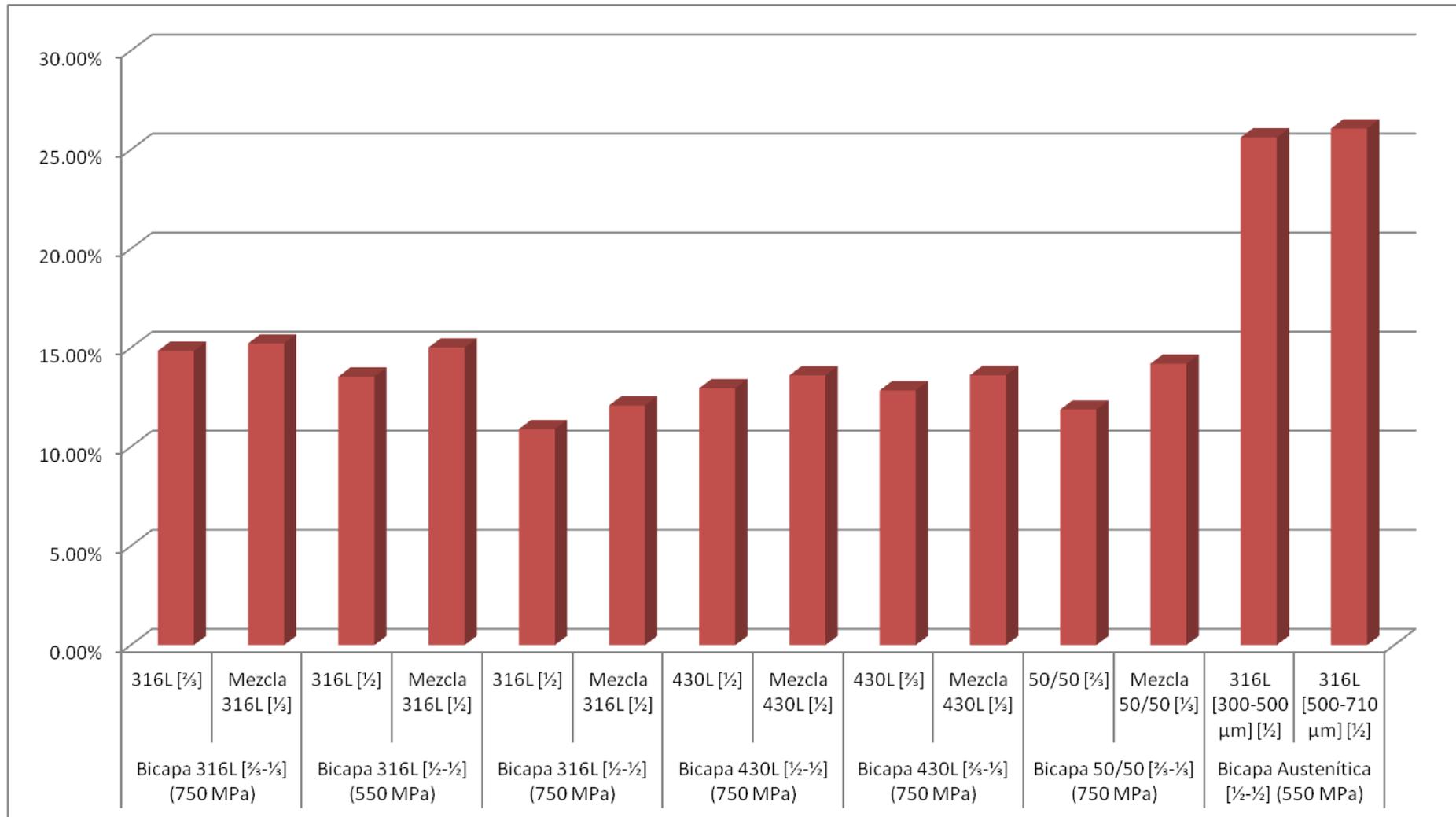
Con respecto al efecto de la adición de polvo de acero austenítico atomizado por gas de morfología esférica se observa que en todos los casos la adición de este polvo origina un incremento de la porosidad con respecto al acero base de referencia, aunque las diferencias no son muy significativas, siempre por debajo del 2%. Esta diferencia es menor cuando se utilizan mayores presiones de compactación.

En relación a las bicapas compactadas a partir de polvo ferrítico, en ambos casos la porosidad superficial de la capa pura es muy similar a la del acero base compactado a la mayor presión de compactación. Además, en ambas bicapas, tanto la capa atomizada por agua como la capa de la mezcla de polvos atomizado por agua y atomizado por gas, la porosidad superficial es muy parecida, aunque ligeramente superior en la capa de la mezcla.

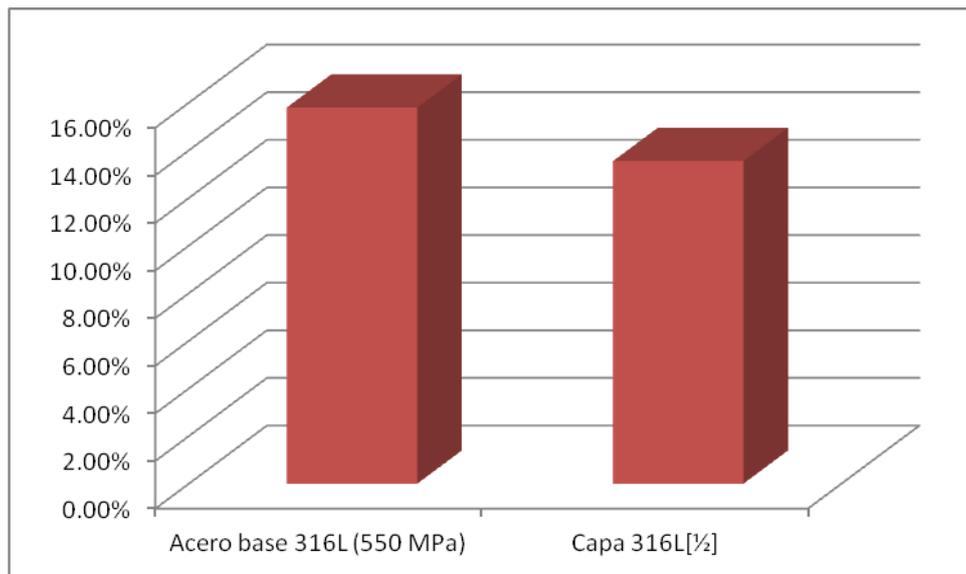
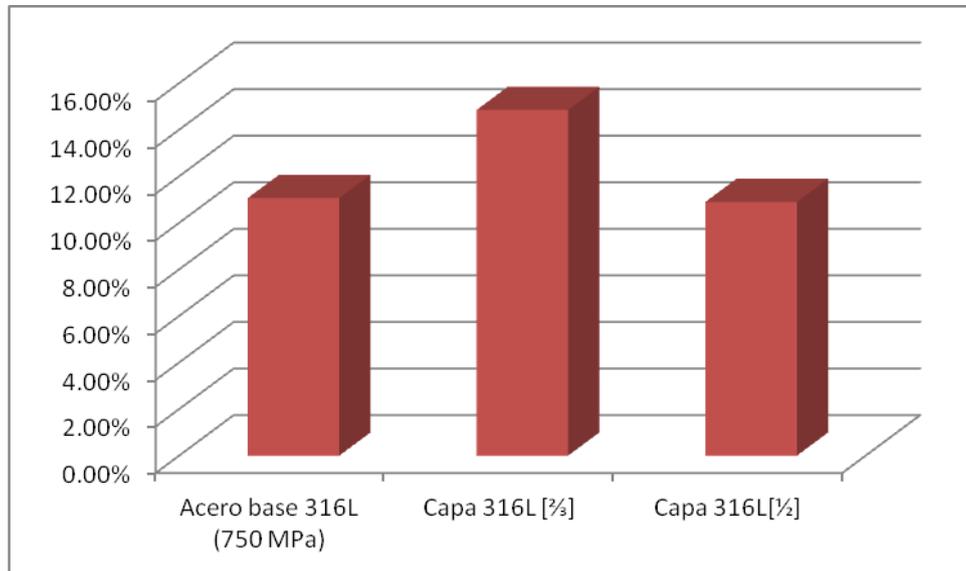
En la Bicapa 50/50 se observa que la porosidad superficial de la capa 50/50 es prácticamente idéntica a la mezcla Dúplex 50/50 compactada a idéntica presión de compactación. Respecto a las dos capas, en este caso, en la capa de la mezcla con polvo atomizado por gas la porosidad superficial aumenta considerablemente. Aun así no hay grandes diferencias con el resto de bicapas de acero austenítico o ferrítico.

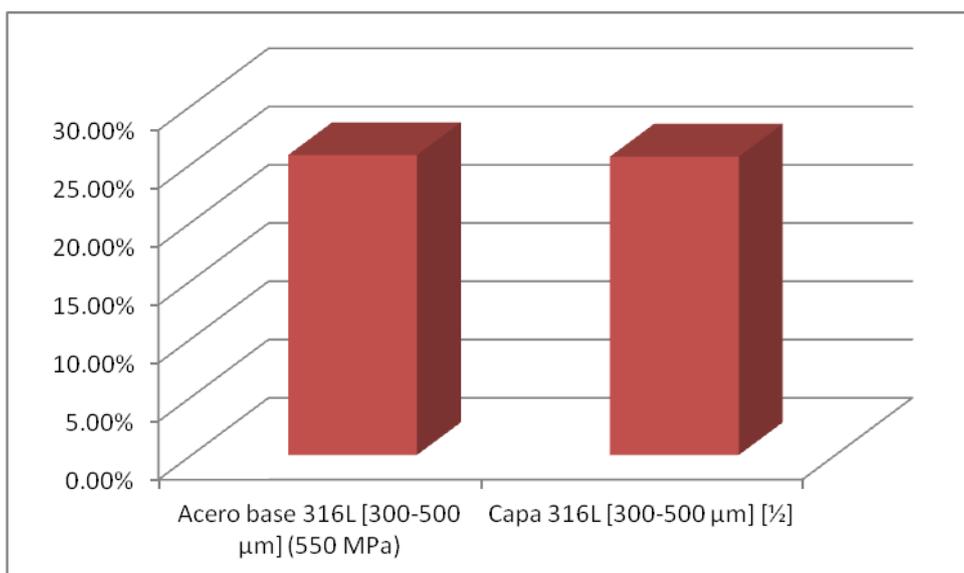
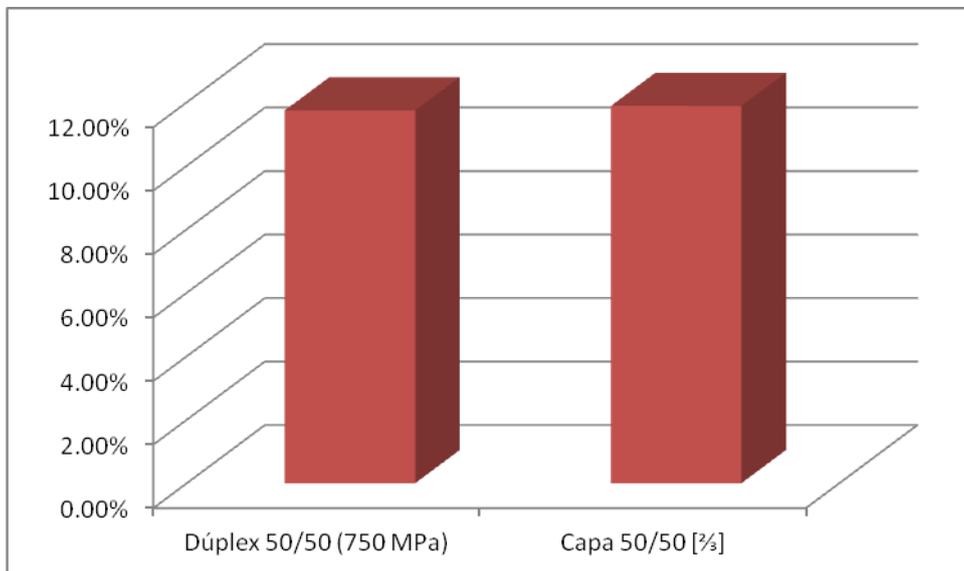
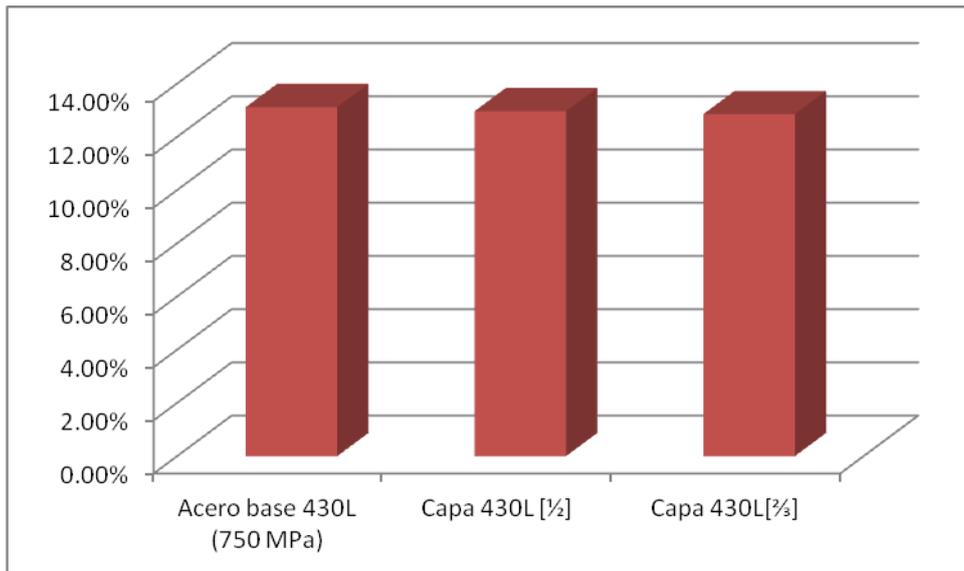
Con objeto de conseguir una bicapa con mayor diferencia de porosidad se procede a la creación de una bicapa austenítica con polvos de acero austenítico con diferente tamaño de grano de los polvos, observándose que la porosidad de ambas capas es muy similar, ligeramente más alta para la de grano grueso. En todos caso la porosidad de ambas capas es mucho más elevada que en el resto de las bicapas, pero cada una de ellas es prácticamente idéntica a la del acero base con el tamaño de grano correspondiente.

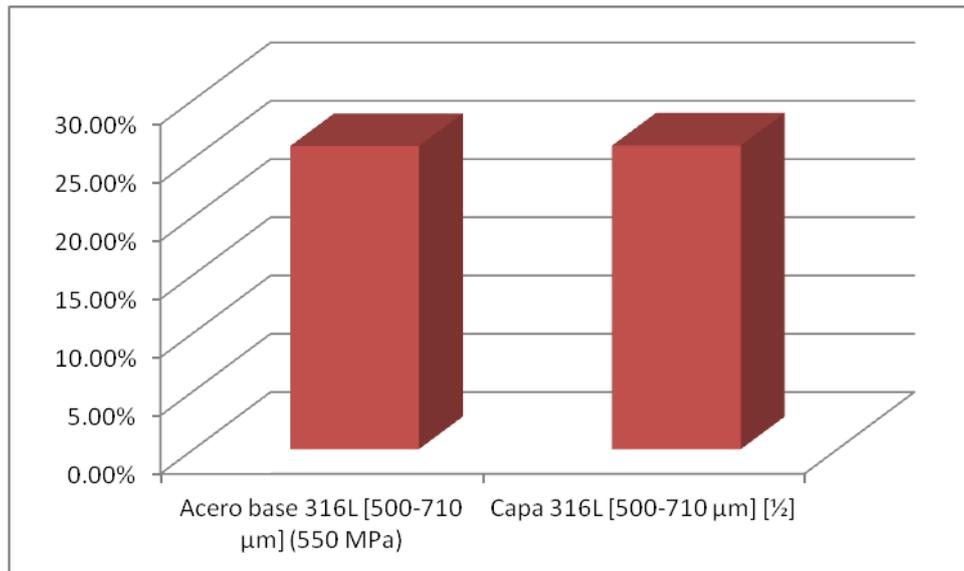
A continuación se adjunta un gráfico comparativo de las diferentes capas de las bicapas:



También se incluye un gráfico comparando las muestras de aceros base y Dúplex 50/50 con las capas atomizadas por agua de las bicapas:







A la vista de los gráficos comparativos anteriores podemos concluir que la formación de bicapas apenas afecta a la porosidad superficial. Sólo en el caso de los aceros austeníticos convencionales se ha observado que para la mayor presión de compactación en una de las bicapas la porosidad es ligeramente superior que en el acero de referencia, pero para menor presión la porosidad es similar o incluso ligeramente más baja.

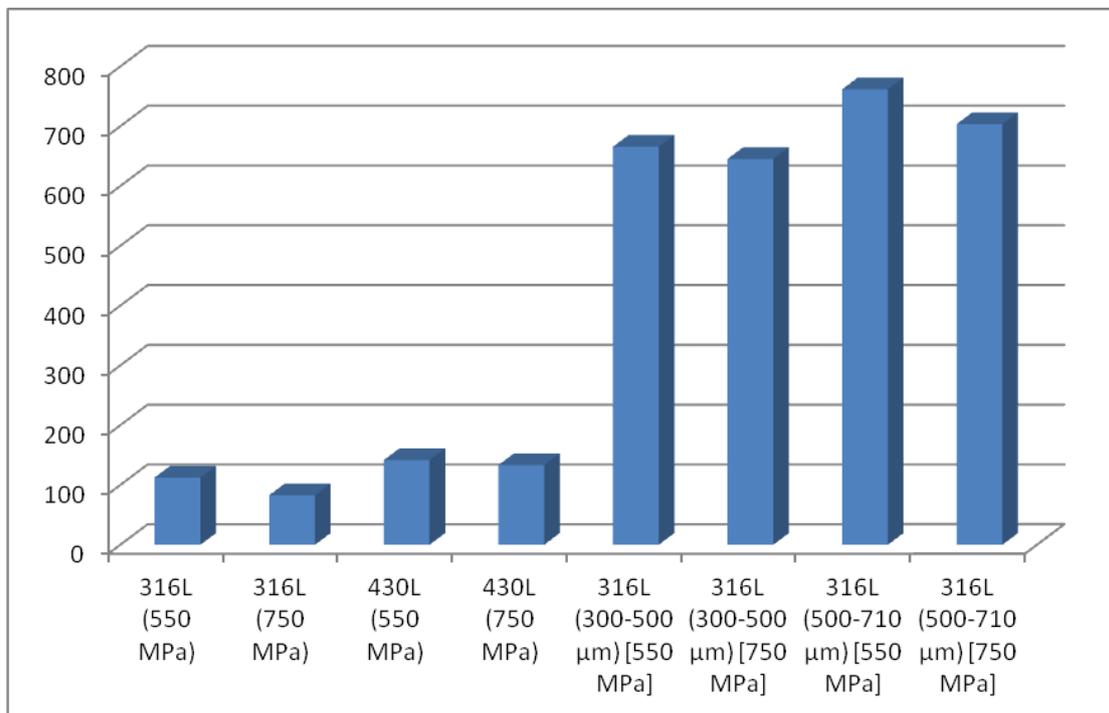
5.1.2 - ÁREA DE LOS POROS

Otro de los parámetros fundamentales a la hora de considerar la porosidad del material de incluso mayor influencia en el desgaste por la permeabilidad de las muestras es sin duda el área de los poros. Los materiales con poros de mayor tamaño presentarán teóricamente mayor permeabilidad a la lubricación y por tanto mejor comportamiento en estas condiciones, especialmente en el caso de lubricación interna.

5.1.2.1 - Aceros base

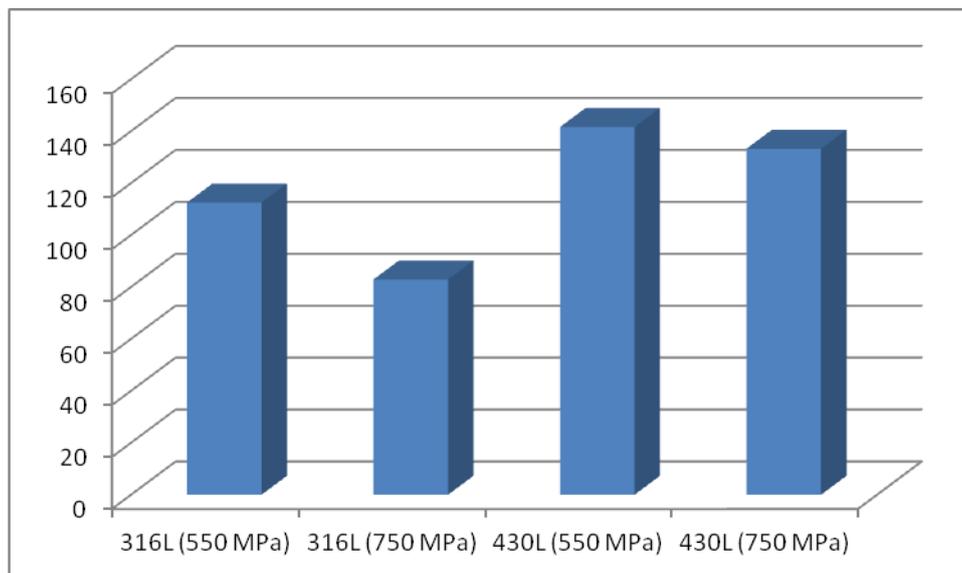
Muestra	Área media (μm^2)	Área mínima (μm^2)	Área máxima (μm^2)	Desviación típica (μm^2)
316L (550 MPa)	112,5065	3,7330	2904,6705	200,6269
316L (750 MPa)	82,8888	3,8738	1684,6948	130,5613
430L (550 MPa)	141,5869	3,0991	6516,8437	348,2607
430L (750 MPa)	133,2485	3,3808	3483,0690	267,2175
316L [300-500 μm] (550 MPa)	665,7440	3,8034	46002,0493	3795,8688
316L [300-500 μm] (750 MPa)	645,2924	3,7330	47734,5683	3996,9894
316L [500-710 μm] (550 MPa)	761,7255	2,3243	53763,7317	4445,1190
316L [500-710 μm] (750 MPa)	703,5697	5,2825	41761,8925	3632,1609

A continuación se exponen en el gráfico los resultados obtenidos en el análisis del tamaño de los poros para todos los aceros base:



A la vista de los resultados se puede observar que la variable de mayor influencia es el tamaño de grano de los polvos. Las muestras de mayor tamaño de grano para el polvo son las que presentan poros seis veces más grandes que las convencionales. Entre los dos tamaños de grano de polvo hay diferencias pero no son tan acusadas como en el caso de los polvos austeníticos convencionales. Los polvos de grano más grueso dan lugar a poros ligeramente más grandes que los de grano intermedio. Con respecto a la presión de compactación para los polvos austeníticos sí se observa que la menor presión de compactación da lugar a poros ligeramente más gruesos para los tres tipos de polvos utilizados.

Con respecto a los aceros convencionales, en el gráfico adjunto se comparan los aceros austeníticos y ferríticos con tamaño de grano estándar por separado con objeto de analizar el efecto de la composición química.

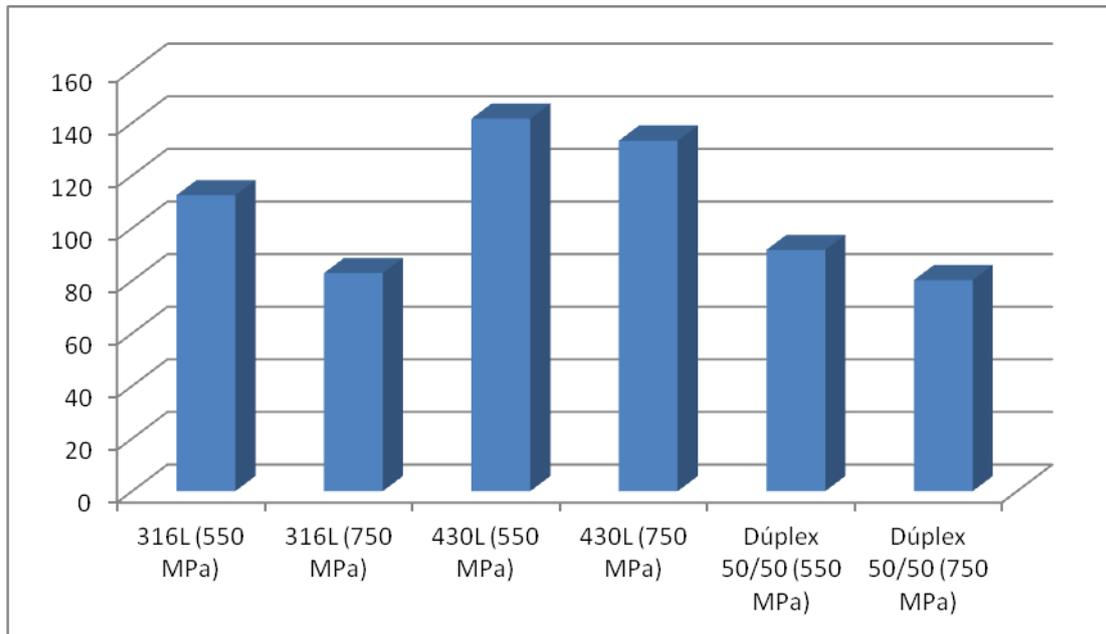


Se observa que al igual que en la porosidad superficial el acero ferrítico presenta poros mucho más gruesos que el austenítico, lo que se relaciona con su mayor porosidad. Se observa igualmente la disminución que en el área de los poros supone la utilización de mayor presión de compactación.

5.1.2.2 - Mezclas

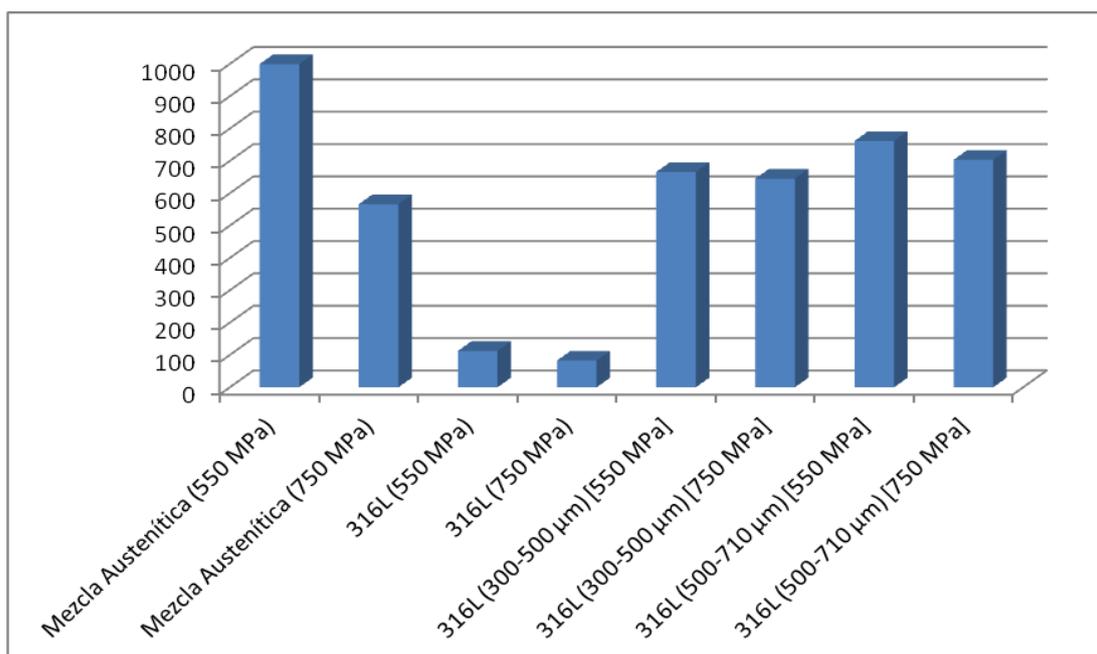
Muestra	Área media (μm^2)	Área mínima (μm^2)	Área máxima (μm^2)	Desviación típica (μm^2)
Dúplex 50/50 (550 MPa)	91,7003	3,3104	3245,7791	162,2177
Dúplex 50/50 (750 MPa)	80,2288	4,0147	1808,9392	146,6649
Mezcla Austenítica (550 MPa)	999,4787	3,3808	53689,5654	5386,0575
Mezcla Austenítica (750 MPa)	566,3196	4,5782	46607,7760	3639,6456

Se adjunta un gráfico comparando el área de los poros de los aceros base y de los aceros Dúplex 50/50 con tamaño de grano estándar:



En el caso de las mezclas de polvo ferrítico y austenítico se observa que el área de los poros disminuye al aumentar la presión de compactación, igual que en el de los aceros de referencia. Con respecto a la composición, el área de los poros del acero ferrítico 430L es claramente mayor al del acero austenítico y la mezcla de polvos correspondiente al acero Dúplex 50/50 es la que presenta poros más pequeños aunque el grado de porosidad superficial es similar.

En cuanto a la mezcla austenítica originada por la mezcla de polvos de tamaños de grano diferentes, en el gráfico adjunto se la va a comparar con el acero base 316L con diferentes tamaños de grano:



Como ocurría en el caso de la porosidad superficial, se observa que las Mezclas Austeníticas presentan grandes diferencias con respecto a los aceros base y en especial, lógicamente, con el acero austenítico con tamaño de grano estándar. La Mezcla Austenítica compactada a menor presión, 550 MPa, presenta poros de área mucho más elevada que la de los componentes austenítico que la integran. La Mezcla Austenítica compactada a 750 MPa presenta poros de tamaño ligeramente menor que los obtenidos para los dos aceros utilizados para su obtención en idéntica presión. Por tanto es la Mezcla Austenítica compactada a baja presión la que presenta los poros más voluminosos y, por tanto, donde es previsible que nos encontremos con porosidad abierta que dé lugar a un mejor comportamiento en ensayos con lubricación interna.

5.1.2.3 - Bicapas

Muestra	Capa	Área media (μm^2)	Área mínima (μm^2)	Área máxima (μm^2)	Desviación típica (μm^2)
Bicapa 316L [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa)	316L [$\frac{2}{3}$]	90,7206	3,5217	1092,4914	136,4484
	Mezcla 316L [$\frac{1}{3}$]	97,3853	3,7330	1932,1975	175,9313
Bicapa 316L [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (550 MPa)	316L [$\frac{1}{2}$]	95,7079	4,7895	2037,4249	175,8254
	Mezcla 316L [$\frac{1}{2}$]	124,9513	5,0008	7858,3873	332,9460
Bicapa 316L [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (750 MPa)	316L [$\frac{1}{2}$]	63,2802	4,4373	997,8994	86,7797
	Mezcla 316L [$\frac{1}{2}$]	79,2077	3,3104	1423,8802	130,2553
Bicapa 430L [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (750 MPa)	430L [$\frac{1}{2}$]	101,6329	4,2964	3996,8801	231,7588
	Mezcla 430L [$\frac{1}{2}$]	136,7853	4,0147	5210,5872	371,8123
Bicapa 430L [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa)	430L [$\frac{2}{3}$]	102,7143	2,9582	2371,8423	215,1616
	Mezcla 430L [$\frac{1}{3}$]	147,9756	5,6347	4821,7248	321,0230
Bicapa 50/50 [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa)	50/50 [$\frac{2}{3}$]	108,0784	6,0573	4425,4669	222,6756
	Mezcla 50/50 [$\frac{1}{3}$]	123,6946	4,6486	2619,7676	228,3320
Bicapa Austenítica [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (550 MPa)	316L [300-500 μm] [$\frac{1}{2}$]	540,7066	4,5782	53924,1788	4335,1404
	316L [500-710 μm] [$\frac{1}{2}$]	618,9779	3,1695	50707,9817	4749,0823

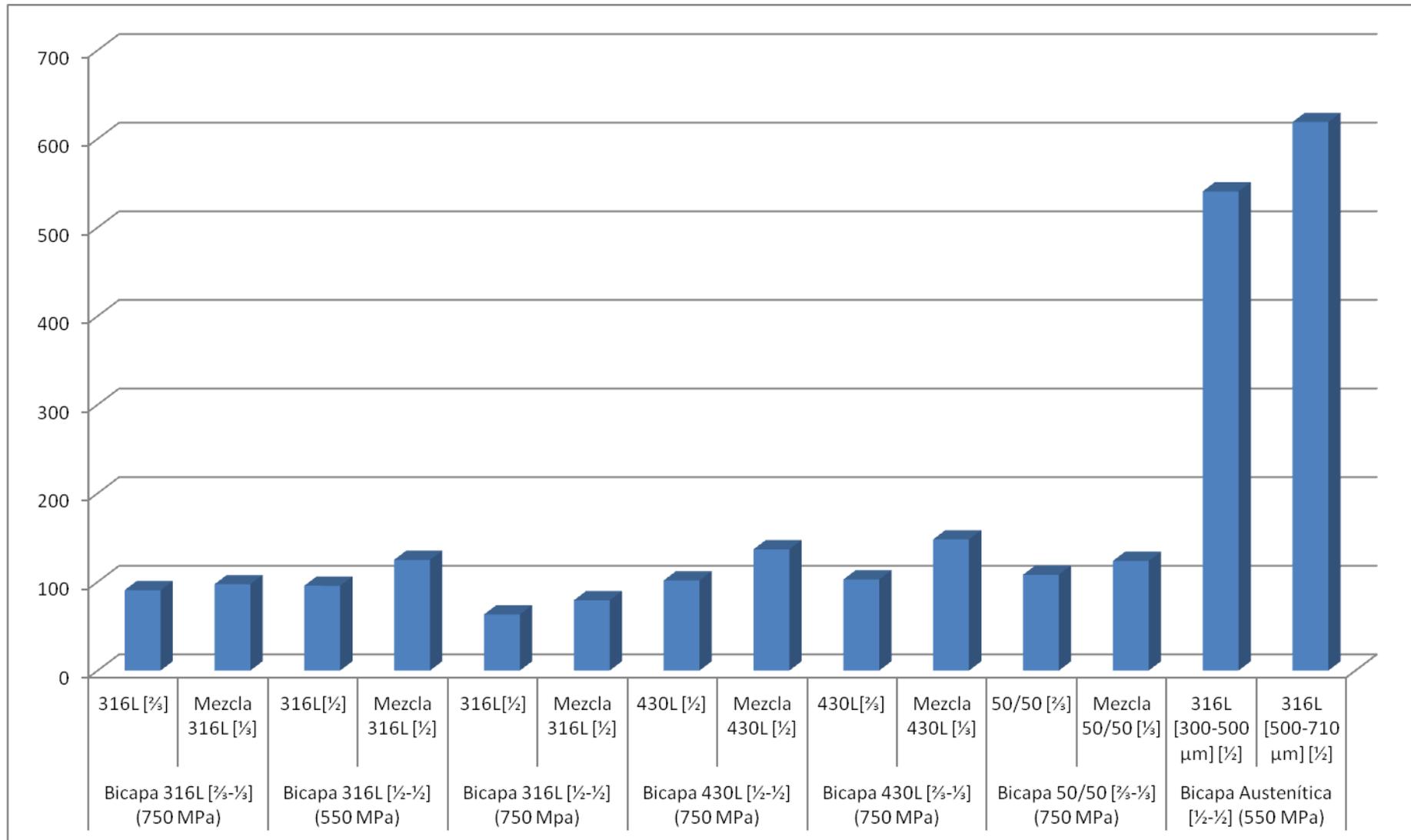
Se observa que, como ya ocurría en el caso de la porosidad superficial, la capa de la mezcla con polvos de acero atomizado por gas presenta ligeras diferencias con el acero de referencia atomizado en agua, si bien en el caso del área de los poros las diferencias son más significativas. En este caso se puede constatar que la capa de la mezcla de todas las bicapas presenta áreas de los poros considerablemente mayores que la capa de polvos atomizados por agua. También se observa mucho más claramente el aumento del área de los poros que supone la disminución de la presión de compactación para la Mezcla Austenítica, especialmente en la capa de la mezcla.

En el caso de las bicapas de polvo ferrítico se observa también que la capa de la mezcla presenta poros de mayor tamaño que el acero de referencia. Respecto a la influencia de la proporción en las bicapas, se observa que tanto para el acero austenítico como para el ferrítico una mayor proporción de mezcla hace que aumente el área de los poros.

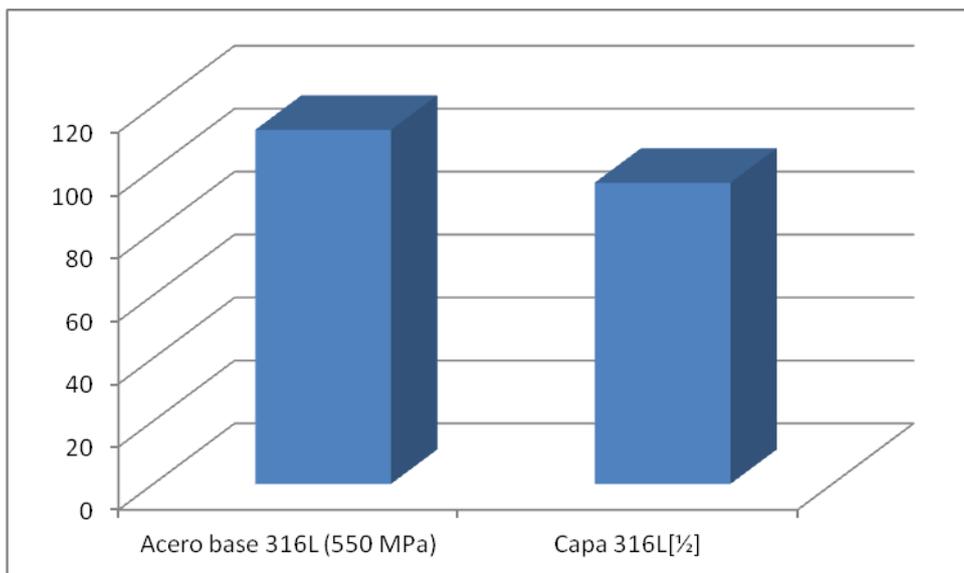
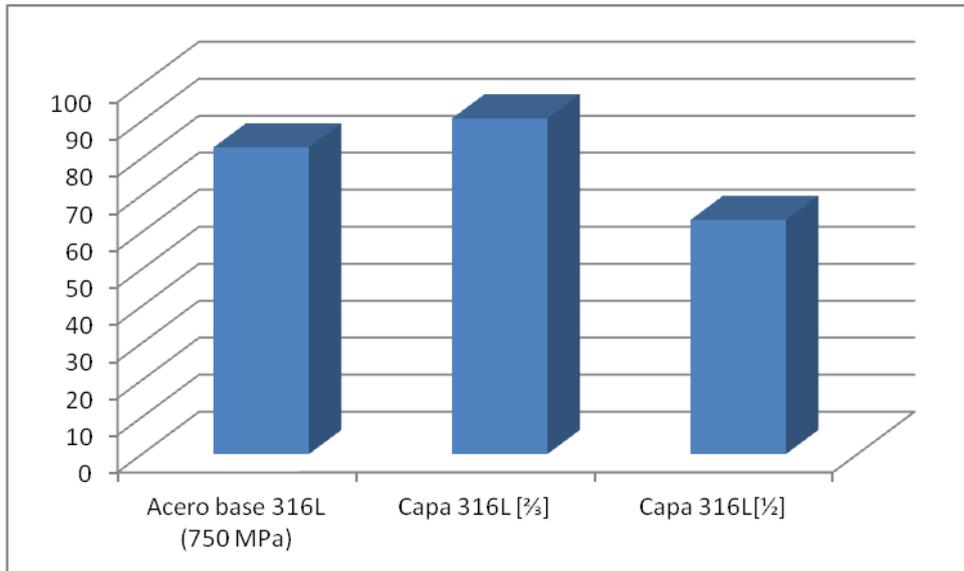


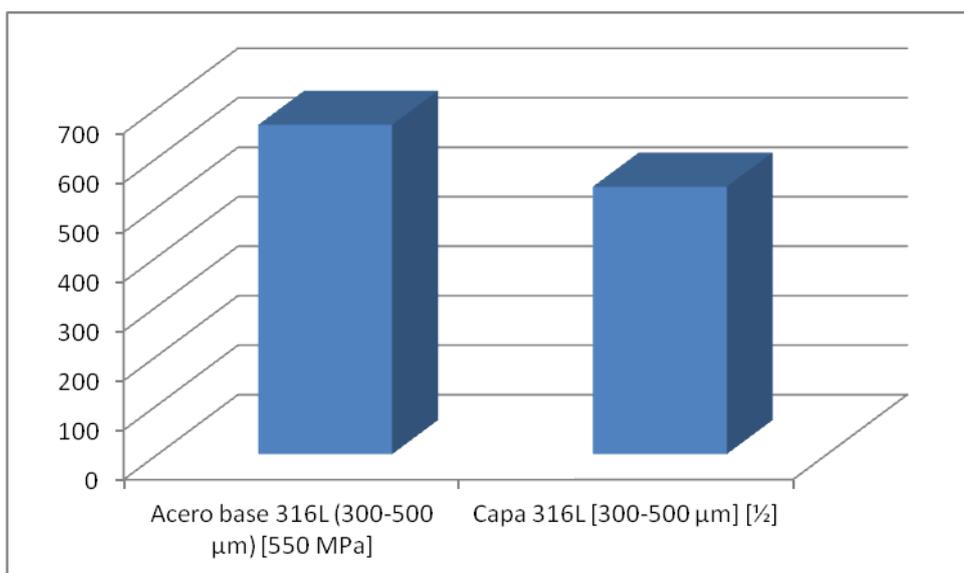
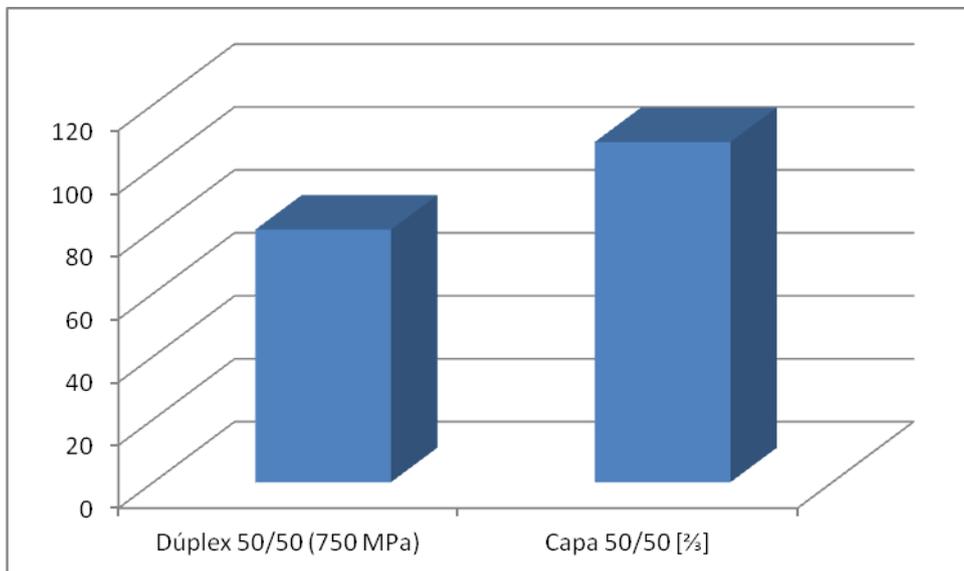
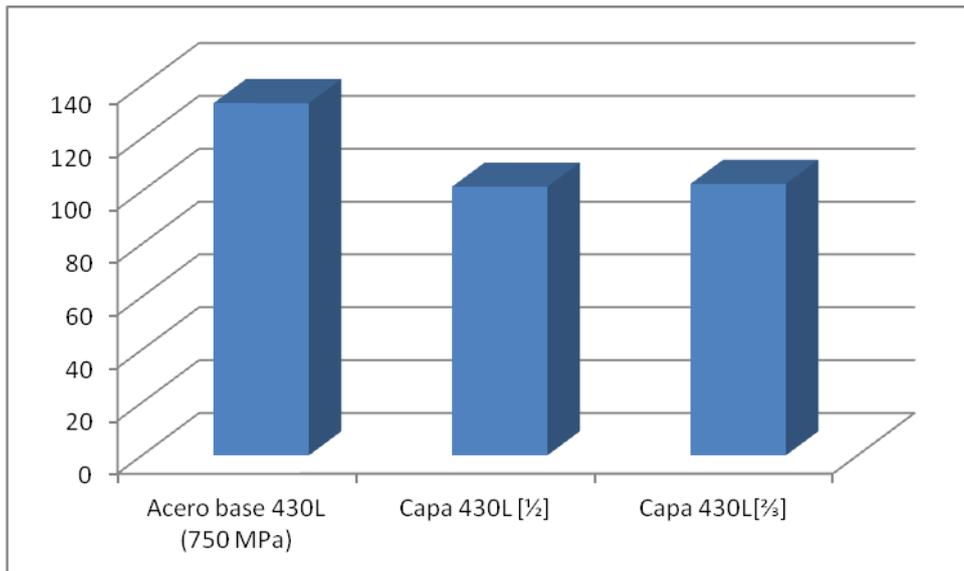
Una vez más la bicapa 50/50 presenta un comportamiento intermedio entre el de las bicapas austeníticas y ferríticas, y finalmente en lo que respecta a la Bicapa Austenítica se observa, como era previsible, un incremento muy notable del área de los poros, como ya ocurría con los aceros base, debido al tamaño de los granos. Como es lógico la capa de grano más grueso da lugar a poros de mayor tamaño que la capa fabricada a partir de polvo austenítico con grano intermedio.

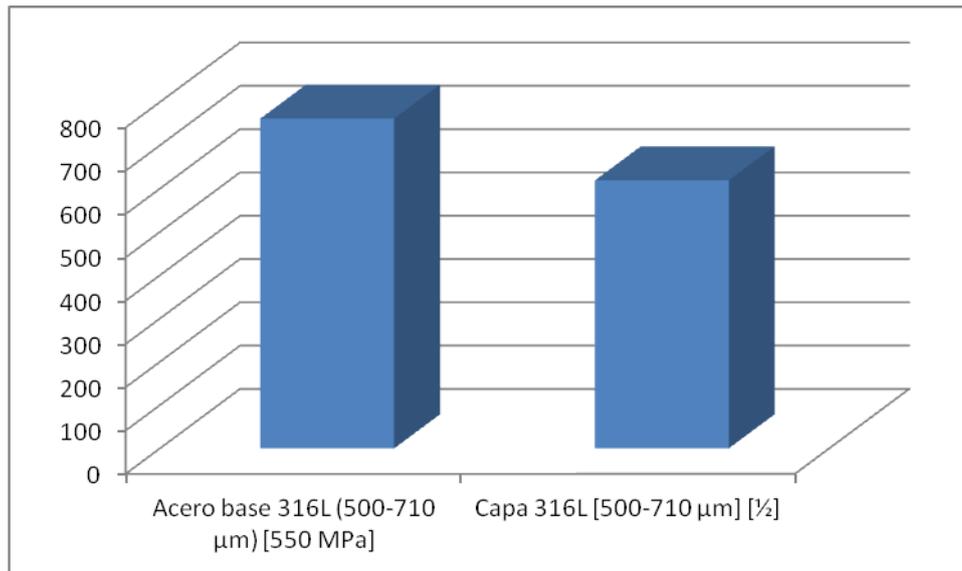
A continuación se adjunta un gráfico comparativo de las diferentes capas de las bicapas con los aceros base de referencia con objeto de realizar las oportunas comparaciones.



También de forma individualizada se incluye un gráfico comparando las muestras de aceros base y Dúplex 50/50 con las capas atomizadas por agua de las bicapas:







A la vista de estos resultados podemos concluir, como no podría ser de otro modo, que el área de los poros es similar cuando se emplea el mismo polvo para producir un material homogéneo o una bicapa, aunque existen algunas diferencias que se comentan a continuación. En el caso del acero austenítico, como ya se ha comentado para la porosidad superficial, el área de los poros excepcionalmente es más alta en la bicapa que en el material homogéneo cuando se trabaja con presiones de compactación más altas y hay menor cantidad de mezcla en la bicapa. En el resto de los casos, al igual que para el acero ferrítico, se observa que en las bicapas el material muestra poros más reducidos que en los aceros homogéneos correspondientes. Con respecto a las bicapas obtenidas a partir de mezclas, en el caso de mezclas de composiciones, Dúplex 50/50, los poros son ligeramente más grandes en la bicapa mientras que para las mezclas de tamaños diferentes se observa que los poros se reducen de tamaño en las bicapas.

5.2 - CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL: MICROSCOPIA ÓPTICA

A continuación se recogen las observaciones microestructurales correspondientes a los aceros base, las mezclas y las bicapas. Para este estudio microestructural se ha realizado un ataque electrolítico con ácido oxálico y en algunos casos en los que ha sido necesario se ha realizado un ataque con reactivo de Vilella. Posteriormente se han observado las muestras con la ayuda de un microscopio y software de análisis de imagen.

5.1.1 - ACEROS BASE

430L (550 MPa)

Se observa una estructura con poros muy grandes como corresponde a la menor presión de compactación utilizada. El acero presenta una estructura completamente laminar. Se observan en los bordes de grano precipitados con mayor grado de disolución, rodeados de zonas más blancas que han podido quedar descromizadas como consecuencia de la precipitación. Se observa que la estructura son colonias típicas del crecimiento por precipitación discontinua. Podemos concluir que el acero presenta estructura de ferrita con precipitados de nitruros/carburos de cromo en forma de constituyente laminar y precipitados aislados más voluminosos en los bordes de grano de dicho microconstituyente.

Las micrografías 1, 2, 3 y 4 recogidas en el anexo muestran estas observaciones con diferentes aumentos.

430L (750 MPa)

Microestructura idéntica a la compactada a 550 MPa. Persisten los poros de gran tamaño, la estructura laminar de ferrita y nitruros/carburos de cromo, y los bordes de las colonias con una tonalidad más blanca, consecuencia de la descromización originada por los precipitados dispersos en los bordes de las colonias.

Las micrografías 5, 6, 7 y 8 recogidas en el anexo muestran estas observaciones con diferentes aumentos.

316L (750 MPa)

La microestructura del acero austenítico 316L es la típica de un acero inoxidable austenítico sinterizado en atmósfera de nitrógeno. Se ven los dos constituyentes típicos: austenita y constituyente laminar. Este último como consecuencia del ataque electroquímico aparece claramente disuelto. La austenita presenta una estructura con bordes de grano completamente rodeados de precipitados en la inmensa mayoría de los casos. Se observan también maclas en el interior del grano austenítico y precipitación transgranular aislada. El constituyente laminar está completamente disuelto y es imposible de identificar como láminas y matriz. La mayor solubilidad de nitrógeno en la austenita hace que no exista un grado de precipitación tal elevado como en el acero ferrítico. El constituyente laminar es minoritario en este caso y muy probablemente se trata de austenita con precipitados de nitruros/carburos de cromo.

Las micrografías 9, 10 y 11 recogidas en el anexo muestran estas observaciones con diferentes aumentos.

316L (550 MPa)

La microestructura es típica de austenita y constituyente laminar. Como en el caso anterior se observan los dos sistemas de precipitación de tipo intergranular continuo y transgranular discontinuo que da lugar a constituyente laminar. Se ve claramente que hay mayor porosidad que en el compactado a 750 MPa y que los poros son más voluminosos como ya se ha comentado en el estudio de porosidad superficial. La cantidad de constituyente laminar es similar, ya que aunque el grado de ataque es ligeramente más alto que para el mismo acero compactado a 750 MPa esto es posiblemente debido a que se ha atacado durante más tiempo. Se revelan mejor las maclas y el constituyente laminar está más disuelto. Persiste la precipitación continua en borde de grano y transgranular aislada en el interior.

Las micrografías 12, 13 y 14 recogidas en el anexo muestran estas observaciones con diferentes aumentos.

316L [500-710 μm] (750 MPa)

Se observa austenita con alto grado de precipitación. Hay un fuerte ataque en las zonas de los poros y se observa que el grado de porosidad superficial es muy elevado, como ya se ha constatado por análisis de imagen. El tamaño de grano austenítico es bastante más heterogéneo que en casos anteriores y los granos austeníticos están afectados por una fuerte precipitación transgranular. Las áreas de grano fino están más severamente atacadas. El tamaño de los poros es mayor que en otros casos.

Las micrografías 15, 16, 17 y 18 recogidas en el anexo muestran estas observaciones con diferentes aumentos.



316L [500-710 μm] (550 MPa)

Se observa que la porosidad es mayor que en el caso anterior, lo que hace que el grado de ataque en las zonas adyacentes a los poros sea todavía más intenso, y ello dificulta todavía más la observación del constituyente laminar que previsiblemente tendría que observarse como en el caso del acero austenítico convencional. La mayoría de los granos están totalmente afectados por los precipitados, dando una estructura tipo ditch, esto es, una red continua de precipitados en borde de grano. La cantidad de constituyente laminar parece escasa, pero el alto grado de porosidad nos impide conocer este dato con detalle, por eso nos proponemos realizar un nuevo ataque que se describe a continuación.

Las micrografías 19, 20 y 21 recogidas en el anexo muestran estas observaciones con diferentes aumentos.

Se ha decidido atacar a esta muestra con reactivo de Vilella, y mediante análisis de imagen se observa que el tamaño de grano es muy heterogéneo, con precipitados en borde de grano y pequeñas cantidades de microconstituyente de tipo laminar. El constituyente laminar es bastante fino y en escasa cantidad, pero sí está presente como era previsible.

Las micrografías 22, 23, 24 y 25 recogidas en el anexo muestran estas observaciones con diferentes aumentos.

316L [300-500 μm] (750 MPa)

El tamaño de grano es bastante heterogéneo como ya ocurría con el acero austenítico obtenido con polvo de tamaño más grueso. Los hay muy voluminosos y también muy reducidos. Hay una disolución completa de un constituyente, que probablemente sea laminar, pero no se ve porque está completamente disuelto y, como en el caso anterior, se confunde con los poros. Los granos austeníticos se ve que tienen precipitados en los bordes, y en algunos casos el grado de continuidad es completo, especialmente en los de tamaño más reducido. También hay gran cantidad de granos afectados por precipitados de tipo transgranular aislado. Se observa que los poros tienen un gran tamaño. La cantidad de constituyente laminar es bastante escasa y los poros muestran como una especie de red continua entre ellos, que podría indicar una red de poros abierta.

Con respecto a la probeta con el tamaño de grano estándar, es destacable la variación del tamaño de los poros. En cuanto al grado de precipitación, es similar o superior en esta muestra.

Las micrografías 26, 27, 28 y 29 recogidas en el anexo muestran estas observaciones con diferentes aumentos.



316L [300-500 μm] (550 MPa)

No hay grandes diferencias entre esta muestra y la obtenida a partir de polvo austenítico de tamaño entre 500 y 710 μm . Muy similares. Se observa en ésta un alto grado de porosidad superficial y granos de austenita afectados por un elevado alto de precipitación inter y transgranular.

Las micrografías 30, 31, 32 y 33 recogidas en el anexo muestran estas observaciones con diferentes aumentos.

5.1.2 - MEZCLAS

Dúplex 50/50 (550 MPa)

La microestructura es radicalmente diferente. Se observan tres microconstituyentes: el laminar, el mixto y la austenita. Las áreas de constituyente laminar grueso están en forma de colonias típicas del crecimiento celular correspondientes al laminar grueso, rodeando al constituyente mixto, que es una mezcla de ferrita, austenita y martensita.

El resto es austenita prácticamente pura, maclada, con precipitados en el borde de grano, con continuidad casi total y aislada en el interior. Podría haber áreas de constituyente laminar fino entre los granos de austenita, que están completamente disueltos. No obstante el más abundante es la austenita con precipitados intergranulares.

Las micrografías 34, 35, 36 y 37 recogidas en el anexo muestran estas observaciones con diferentes aumentos.

Dúplex 50/50 (750 MPa)

La microestructura es la misma que el acero compactado a 550 MPa. Parece que hay menos áreas de estructura laminar gruesa rodeando al constituyente mixto y el constituyente austenítico sigue siendo mayoritario.

Las micrografías 38, 39 y 40 recogidas en el anexo muestran estas observaciones con diferentes aumentos.



Mezcla Austenítica (750 MPa)

La microestructura es muy similar a las muestras anteriormente caracterizadas que se han utilizado para su obtención. Se sigue apreciando la red que une los poros, especialmente disuelta y con continuidad, lo que también podría ser indicativo de una red abierta. El grado de precipitación transgranular de tipo continuo es elevado como ya se apreciaba en los aceros obtenidos a partir de los polvos de referencia. El ataque hace que no se pueda advertir constituyente laminar, aunque está como ya se ha observado claramente en el ataque con Vilella. Persiste la heterogeneidad en el tamaño de grano.

Las micrografías 41, 42, 43 y 44 recogidas en el anexo muestran estas observaciones con diferentes aumentos.

Mezcla Austenítica (550 MPa)

La microestructura es muy similar a las muestras ya caracterizadas, pero hay en algunas áreas un mayor ataque que recuerda al constituyente mixto. Sin embargo, la medida de respuesta magnética con ferritómetro es nula en ambas mezclas, con lo que cabe concluir que la cantidad de martensita/ferrita es mínima.

Las micrografías 45, 46, 47 y 48 recogidas en el anexo muestran estas observaciones con diferentes aumentos.

5.1.3 - BICAPAS

Bicapa 316L [½-½] (750 MPa)

Capa 316L [½]

Parece que hay menos constituyente laminar que en el acero convencional de referencia. Hay precipitación discontinua en borde de grano y se observa más precipitación transgranular aislada que en el acero de referencia compactado a la misma presión. El grano es más homogéneo.

Las micrografías 49, 50 y 51 recogidas en el anexo muestran estas observaciones con diferentes aumentos.

Capa Mezcla 316L [½]

Menos constituyente laminar que en el acero convencional. Hay precipitación discontinua en borde de grano y más precipitación transgranular que en el acero de referencia. Se reconocen las áreas de austenita con precipitación transgranular discontinua, conservando la forma esférica, derivadas del atomizado por gas.



El tamaño de grano es más heterogéneo y ligeramente más grueso que en la capa del 316L.

Las micrografías 52, 53 y 54 recogidas en el anexo muestran estas observaciones con diferentes aumentos.

Bicapa 316L [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (550 MPa)

Capa 316L [$\frac{1}{2}$]

Se observa más porosidad y más precipitación laminar que en la muestra compactada a mayor presión. La estructura es austenítica y el constituyente laminar se observa en mayor proporción que en la muestra compactada a 750 MPa, y con menor grado de precipitación transgranular aislada.

Las micrografías 55, 56 y 57 recogidas en el anexo muestran estas observaciones con diferentes aumentos.

Capa Mezcla 316L [$\frac{1}{2}$]

Hay algo más de precipitado transgranular aislada que en la capa del agua, especialmente en las áreas esféricas derivadas del atomizado por gas. El grano parece ligeramente más fino que en la muestra compactada a 750 MPa.

Las micrografías 58, 59 y 60 recogidas en el anexo muestran estas observaciones con diferentes aumentos.

Bicapa 316L [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa)

Capa 316L [$\frac{2}{3}$]

La microestructura es muy parecida a la del acero base: se observa la típica estructura de austenita con precipitación continua en borde de grano y constituyente laminar completamente disuelto por el ataque electrolítico.

Las micrografías 61, 62 y 63 recogidas en el anexo muestran estas observaciones con diferentes aumentos.

Capa Mezcla 316L [$\frac{1}{3}$]

La capa de mezcla presenta un ligero incremento de la precipitación continua en el interior de los granos austeníticos. Tamaño de grano más fino que en la capa de acero base; al igual que ésta también tiene constituyente laminar disuelto en prácticamente la misma proporción. Se observa que las áreas de atomizado por gas tienen más precipitación transgranular aislada y menos constituyente laminar.

Las micrografías 64, 65 y 66 recogidas en el anexo muestran estas observaciones con diferentes aumentos.

En ambos casos el tamaño de grano es irregular: hay granos más gruesos y más finos, estos últimos en las inmediaciones del constituyente granular. El grano es ligeramente más fino en el caso de la mezcla.

Se observa que las zonas derivadas del polvo atomizado por gas dan lugar a una precipitación transgranular más aislada y quizás menos precipitación laminar de tipo celular, aunque la microestructura básicamente es común para las dos bicapas y muy parecida entre todas la bicapas austeníticas.

Bicapa 430L [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (750 MPa)

Capa 430L [$\frac{1}{2}$]

La microestructura es la típica y ya observada en el acero ferrítico convencional: se trata de constituyente laminar al 100%.

Las micrografías 67, 68 y 69 recogidas en el anexo muestran estas observaciones con diferentes aumentos.

Capa Mezcla 430L [$\frac{1}{2}$]

En este caso la microestructura es diferente a la observada en el acero base. La mezcla con polvo atomizado por gas origina modificaciones sustanciales, ya que la microestructura es muy diferente en los dos polvos. En el atomizado por gas, hay precipitados continuos aislados en el interior de los granos de ferrita y el tamaño de grano es grueso, mientras que en la capa del atomizado por agua, los precipitados son laminares discontinuos y el tamaño de grano es más fino. Parece como que el constituyente laminar va expandiéndose hacia dentro del área de atomizado por gas, que va reduciéndose y perdiendo su forma esférica.

Las micrografías 70, 71 y 72 recogidas en el anexo muestran estas observaciones con diferentes aumentos.

Bicapa 430L [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa)

Capa 430L [$\frac{2}{3}$]

La microestructura es la misma que la del acero base: todo constituyente laminar prácticamente al 100%. Precipitados más voluminosos en borde de grano y áreas ferríticas adyacentes blanquecidas por la desaleación originada por la precipitación intergranular.

Las micrografías 73, 74, 75 y 76 recogidas en el anexo muestran estas observaciones con diferentes aumentos.



Capa Mezcla 430L [$\frac{1}{3}$]

Se ve una estructura completamente diferente, como ya ocurría en la otra bicapa, puesto que se distinguen claramente los dos polvos de acero atomizados en agua y en gas. En las agrupaciones de grano que corresponden al polvo atomizado por gas el grado de precipitación es mucho menos intenso que en las atomizadas en agua que presentan la típica precipitación laminar. El atomizado por gas tiene solamente precipitados en borde de grano y además continuos aislados en el interior del grano ferrítico y, por otra parte, se ve la estructura típica: constituyente laminar en forma de células con precipitados intergranulares derivados del polvo atomizado en agua. No obstante se observa que existe también interdifusión entre los dos polvos.

Las micrografías 77, 78 y 79 recogidas en el anexo muestran estas observaciones con diferentes aumentos.

Bicapa 50/50 [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa)

Capa 50/50 [$\frac{2}{3}$]

En la microestructura se observan claramente la austenita y el constituyente mixto; ambos con precipitados en borde de grano.

Al margen de estos dos microconstituyentes mayoritarios, en la probeta se observan áreas de colonias del constituyente laminar grueso rodeados de constituyente mixto afectado por precipitación transgranular aislada. La precipitación en la austenita es más de tipo intergranular que transgranular.

Las micrografías 80, 81 y 82 recogidas en el anexo muestran estas observaciones con diferentes aumentos.

Capa Mezcla 50/50 [$\frac{1}{3}$]

Como en el acero base mezclado se observan áreas del constituyente laminar grueso. Este también tiene la apariencia de colonias de tipo laminar grueso, aunque quizás menos voluminosas que en la capa del acero base. El laminar fino es difícil de observar, ya que puede que esté completamente disuelto. Las áreas correspondientes al atomizado por gas tienen estructura austenítica, pero sin maclas, con precipitados intergranulares y transgranulares dispersos de tipo continuo y en ellas apenas se genera constituyente laminar de tipo discontinuo.

Las micrografías 83, 84 y 85 recogidas en el anexo muestran estas observaciones con diferentes aumentos.



Bicapa Austenítica [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (550 MPa)

Capa 316L [300-500 μm] [$\frac{1}{2}$]

La microestructura es muy similar a la correspondiente al acero base obtenido a partir de polvo de grano intermedio. Se trata de austenita afectada por una fuerte precipitación intergranular y transgranular de tipo continuo y aislado. No se descarta la existencia de constituyente de tipo laminar que pueda estar disuelto por el ataque electrolítico y confundirse con los poros de hecho se han observado pequeñas áreas sin disolver que confirman esta hipótesis.

Las micrografías 86, 87, 88 y 89 recogidas en el anexo muestran estas observaciones con diferentes aumentos.

Capa 316L [500-710 μm] [$\frac{1}{2}$]

La microestructura es muy similar a la correspondiente al acero base, con grandes poros claramente más grandes y con mayor grado de continuidad en la retícula que une a los mismos. En cuanto a la microestructura, una vez más la austenita afectada por una intensa precipitación es la fase mayoritaria; aunque no se descartan agrupaciones de tipo laminar.

Las micrografías 90, 91, 92 y 93 recogidas en el anexo muestran estas observaciones con diferentes aumentos.



5.3 - CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

En este apartado y como paso previo a los ensayos de comportamiento en servicio que se expondrán en los siguientes apartados, se analiza el comportamiento mecánico de los aceros pulvimetalúrgicos mediante los resultados del ensayo de dureza Vickers a escala macro y microscópica. Se estudian las diferentes composiciones de los aceros base ferríticos y austeníticos, estos últimos también obtenidos con diferente tamaño de partícula de polvo, las mezclas y las diferentes bicapas que se han sinterizado, todos ellos con las correspondientes presiones de compactación utilizadas. Se analiza en primer lugar el comportamiento de las muestras mediante el ensayo de microdureza en el que se evalúa la dureza de los microconstituyentes que integran la estructura de los diferentes aceros evitando, en la medida de lo posible, la influencia de los poros del mismo, si bien debemos tener en cuenta que también el grado de porosidad puede influir en los resultados obtenidos.

Teniendo esto en cuenta, en el siguiente apartado se analiza el comportamiento del material en un ensayo macroscópico donde, al margen de la microestructura, el grado de porosidad influye en mayor grado en los datos de dureza obtenidos.

5.3.1 - ENSAYO DE MICRODUREZA

En este apartado se analiza el comportamiento mecánico de los aceros a estudiar mediante los resultados del ensayo de dureza Vickers. Se estudian los aceros base austenítico y ferrítico, las mezclas y las diferentes bicapas. Se trata de un ensayo de microdureza en el que se evalúa la dureza de los microconstituyentes y en menor grado la porosidad de los mismos.

5.3.1.1 - Aceros base

A continuación se exponen los resultados de microdureza obtenidos para los dos aceros base (austenítico 316L y ferrítico 430L).

Se usará como nomenclatura en las tablas la denominación del acero base y entre paréntesis la presión de compactación.

En la siguiente tabla se incluyen los resultados de las diez mediciones realizadas en cada muestra:

	316L (750 MPa)	316L (550 MPa)	430L (750 MPa)	430L (550 MPa)
Medición 1	182,8	123,1	163,2	203,3
Medición 2	166,7	118,2	141,5	112,4
Medición 3	185,7	102,9	106,8	121,6
Medición 4	154	102,6	152,6	113,3
Medición 5	137,3	76,9	101,2	99,8
Medición 6	141,9	104,8	216,7	115,6
Medición 7	165,2	94,2	159	175
Medición 8	230,7	85,2	169,2	160,4
Medición 9	204,6	99,8	183,9	194,8
Medición 10	122,5	77,5	98,9	70,7

	316L [500-710 μm] (750 MPa)	316L [500-710 μm] (550 MPa)	316L [300-500 μm] (750 MPa)	316L [300-500 μm] (550 MPa)
Medición 1	222,7	194,8	234	229,9
Medición 2	207,4	225,9	220,4	223,5
Medición 3	229,9	199,3	236,5	230,6
Medición 4	237,3	210,2	233,1	207,4
Medición 5	191,1	140,7	195,4	183,9
Medición 6	223,5	224,3	198,6	217,4
Medición 7	247	215,2	231,5	224,8
Medición 8	239	215,2	219,7	229,9
Medición 9	220,4	218,2	228,3	221,2
Medición 10	200,6	141,5	165,7	205,3

Tal y como se ha detallado en la descripción del proceso experimental, se lleva a cabo un tratamiento estadístico de los datos:

1. Se eliminan los dos valores más pequeños:

	316L (750 MPa)	316L (550 MPa)	430L (750 MPa)	430L (550 MPa)
Medición 1	182,8	123,1	163,2	203,3
Medición 2	166,7	118,2	141,5	112,4
Medición 3	185,7	102,9	106,8	121,6
Medición 4	154	102,6	152,6	113,3
Medición 5	141,9	104,8	216,7	115,6
Medición 6	165,2	94,2	159	175
Medición 7	230,7	85,2	169,2	160,4
Medición 8	204,6	99,8	183,9	194,8

	316L [500-710 μm] (750 MPa)	316L [500-710 μm] (550 MPa)	316L [300-500 μm] (750 MPa)	316L [300-500 μm] (550 MPa)
Medición 1	222,7	194,8	234	229,9
Medición 2	207,4	225,9	220,4	223,5
Medición 3	229,9	199,3	236,5	230,6
Medición 4	237,3	210,2	233,1	207,4
Medición 5	223,5	224,3	198,6	217,4
Medición 6	247	215,2	231,5	224,8
Medición 7	239	215,2	219,7	229,9
Medición 8	220,4	218,2	228,3	221,2

2. Se calcula la media, la varianza y la desviación típica:

	316L (750 MPa)	316L (550 MPa)	430L (750 MPa)	430L (550 MPa)
Media	178,95	103,85	161,61	149,55
Varianza	818,67	148,17	1012,63	1475,72
Desviación típica	28,61	12,17	31,82	38,41

	316L [500-710 μm] (750 MPa)	316L [500-710 μm] (550 MPa)	316L [300-500 μm] (750 MPa)	316L [300-500 μm] (550 MPa)
Media	228,4	212,89	225,26	223,09
Varianza	157,33	122,50	153,95	62,05
Desviación típica	12,54	11,07	12,41	7,88

3. Se añaden las desviaciones superiores e inferiores:

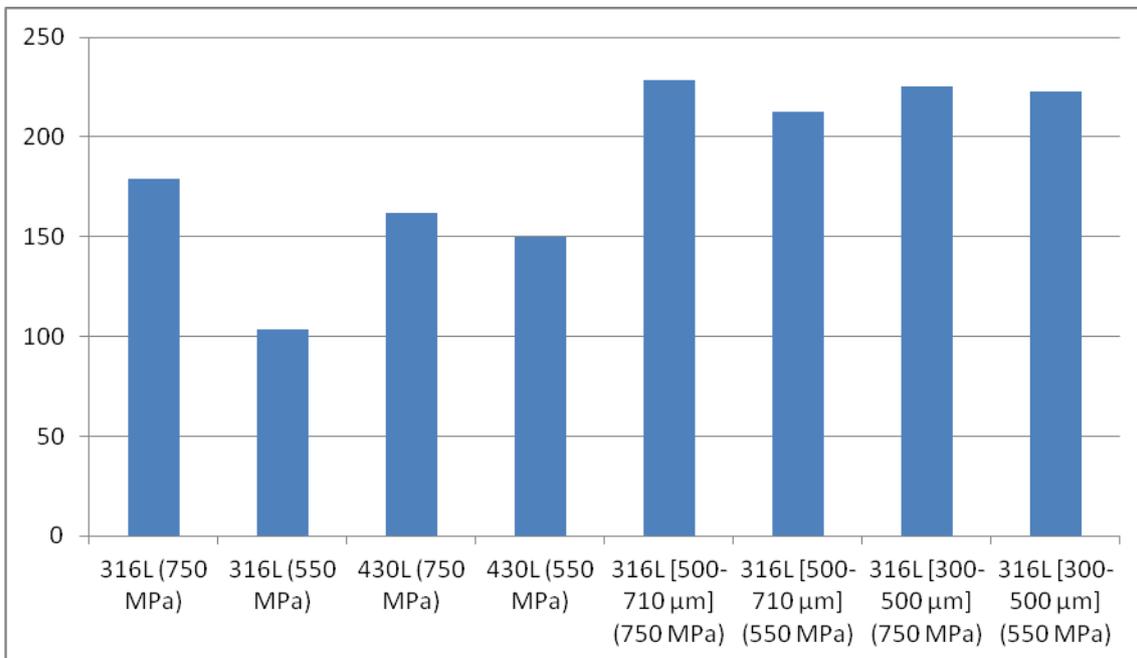
	316L (750 MPa)	316L (550 MPa)	430L (750 MPa)	430L (550 MPa)
D. Superior	207,56	116,02	193,43	187,96
Media	178,95	103,85	161,61	149,55
D. Inferior	150,34	91,68	129,79	111,14

	316L [500-710 μm] (750 MPa)	316L [500-710 μm] (550 MPa)	316L [300-500 μm] (750 MPa)	316L [300-500 μm] (550 MPa)
D. Superior	240,94	223,96	237,67	230,97
Media	228,4	212,89	225,26	223,09
D. Inferior	215,86	201,82	212,85	215,21

A la vista de los resultados anteriores y tal como se muestra en la gráfica adjunta se puede observar que en el caso del acero austenítico hay una clara diferencia entre las muestras compactadas con polvos de diferente tamaño de grano. En cuanto a las probetas de tamaño de grano estándar poseen una microdureza claramente menor que el resto. El acero austenítico convencional tiene una microdureza similar a la de los aceros ferríticos, levemente mayor en el caso de la muestra compactada a 750 MPa y claramente inferior en el caso de las

muestras compactadas a 550MPa. Respecto a la influencia de la presión de compactación en los aceros convencionales se observa que, en el caso de los aceros austeníticos, hay un claro salto entre la probeta compactada a una y otra presión, siendo mucho más blanda la compactada a 550 MPa y por tanto con mayor grado de porosidad superficial. En el caso del acero ferrítico las diferencias no son tan importantes.

La presión de compactación no es una variable decisiva en los aceros ferríticos como tampoco lo es en el caso de los aceros austeníticos sinterizados a partir de polvos de grano grueso e intermedio. Por otro lado, en referencia a las probetas compactadas con tamaño de grano más grueso, se observa que la microdureza aumenta considerablemente, y es muy similar a ambas presiones de compactación, levemente mayor en las compactadas a 750 MPa. Las muestras con grano intermedio tienen una dureza similar y claramente superior a la que presentan las muestras obtenidas con polvos convencionales. Esta mayor dureza debemos achacarla a la microestructura, teniendo en cuenta que estas muestras con grano grueso son mucho más porosas y por tanto, en principio, más porosas. El diferente tamaño de grano austenítico y sobretodo el mayor grado de precipitación podría explicar estos resultados.



5.3.1.2 - Mezclas

A continuación se exponen los resultados de microdureza obtenidos para los aceros dúplex obtenidos a partir de mezclas de polvos praleados ferríticos y austeníticos. Como en el caso anterior, se incluyen los datos de las diez improntas realizadas en cada muestra. También se analiza la microdureza de la mezcla de polvos austeníticos grueso-intermedio para las dos presiones de compactación seleccionadas.

	Dúplex 50/50 (750 MPa)	Dúplex 50/50 (550 MPa)	Mezcla Austenítica (750 MPa)	Mezcla Austenítica (550 MPa)
Medición 1	203,9	172,3	191,1	207,4
Medición 2	196,1	150	214,5	201,9
Medición 3	250,6	172,8	176,6	237,3
Medición 4	176,6	127	222,7	194,2
Medición 5	106,1	103,1	165,2	93,8
Medición 6	120,3	240,8	243,4	246,1
Medición 7	218,2	147,1	246,1	229,9
Medición 8	167,7	200,6	258,1	191,7
Medición 9	146,7	149,2	234,8	248,89
Medición 10	100,9	100,7	164,2	178,2

Y se lleva a cabo el tratamiento estadístico de los mismos:

1. Se eliminan los dos valores más pequeños:

	Dúplex 50/50 (750 MPa)	Dúplex 50/50 (550 MPa)	Mezcla Austenítica (750 MPa)	Mezcla Austenítica (550 MPa)
Medición 1	203,9	172,3	191,1	207,4
Medición 2	196,1	150	214,5	201,9
Medición 3	250,6	172,8	176,6	237,3
Medición 4	176,6	127	222,7	194,2
Medición 5	120,3	240,8	243,4	246,1
Medición 6	218,2	147,1	246,1	229,9
Medición 7	167,7	200,6	258,1	191,7
Medición 8	146,7	149,2	234,8	248,89

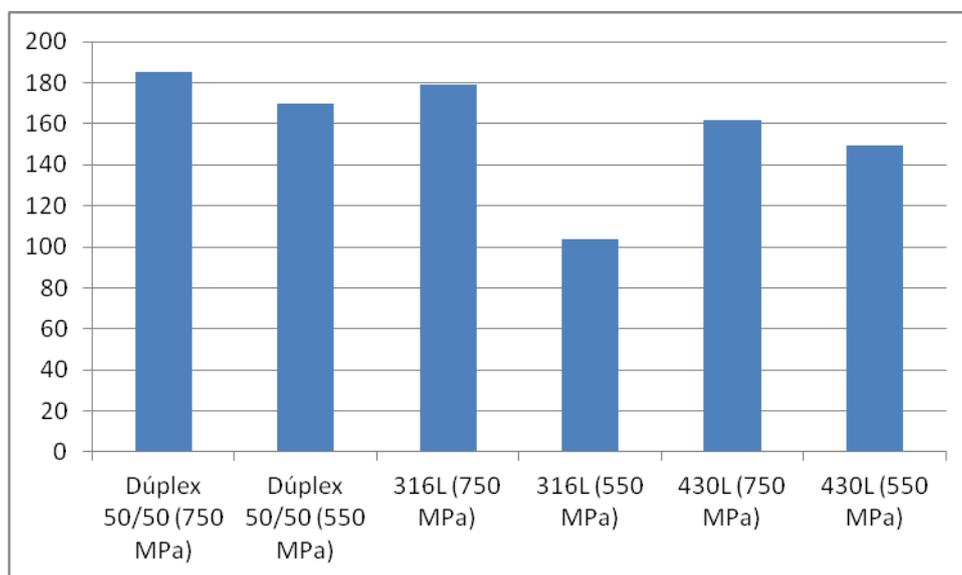
2. Cálculo de la media, la varianza y la desviación típica:

	Dúplex 50/50 (750 MPa)	Dúplex 50/50 (550 MPa)	Mezcla Austenítica (750 MPa)	Mezcla Austenítica (550 MPa)
Media	185,01	169,98	223,41	219,67
Varianza	1701,26	1309,74	794,65	552,17
Desviación típica	41,25	36,19	28,19	23,50

3. Desviaciones superiores e inferiores junto con la media aritmética:

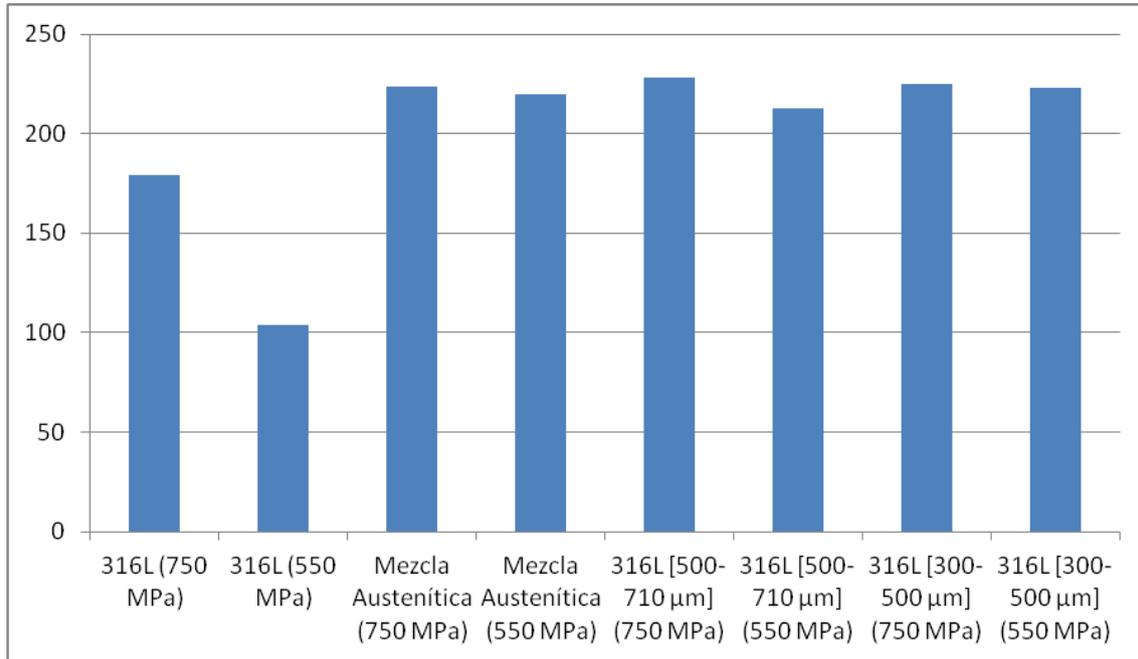
	Dúplex 50/50 (750 MPa)	Dúplex 50/50 (550 MPa)	Mezcla Austenítica (750 MPa)	Mezcla Austenítica (550 MPa)
D. Superior	226,26	206,17	251,6	243,17
Media	185,01	169,98	223,41	219,67
D. Inferior	143,76	133,79	195,22	196,17

En primer lugar se van a comparar los aceros Dúplex con los aceros base con tamaño de grano estándar:



Los resultados de microdureza indican que el comportamiento de los aceros Dúplex difiere en gran medida de los valores de los aceros base. En especial, se puede observar que el Dúplex 50/50 compactado a 750 MPa tiene mayor dureza que los aceros base compactados a idéntica presión, con lo cual la mezcla de polvos de diferentes composiciones químicas supone una mejora de las propiedades mecánicas gracias a la menor porosidad superficial y a la formación de microconstituyentes claramente diferentes que los aceros base, en especial del constituyente mixto. En el caso de las muestras compactadas a menor presión se observa que también la composición dúplex tiene una microdureza mayor que los aceros base. La mezcla Dúplex 50/50 es la que presenta la mayor dureza respecto a los aceros convencionales con tamaño de polvo menor de 150 micras.

Posteriormente se compara la Mezcla Austenítica con el acero base 316L con diferentes tamaños de grano:



Se aprecia que en este caso las diferencias entre la Mezcla Austenítica y los aceros austeníticos de partida con diferente tamaño de polvo son mucho menores. La Mezcla Austenítica posee también una microdureza muy alta similar a la del acero base con tamaño de grano grueso para ambas presiones de compactación. En este caso, como ya ocurría con los aceros austeníticos de grano grueso, tampoco hay diferencias significativas entre las dos presiones de compactación que sin embargo son importantes en los aceros convencionales. En este caso el mayor grado de porosidad de todas las muestras hace que la influencia de la presión de compactación no sea decisiva.

5.3.1.3 - Bicapas

A continuación se exponen los resultados de microdureza obtenidos para las diferentes bicapas, en las dos capas de cada una de ellas, para las diferentes relaciones de polvos y para las diferentes presiones de compactación utilizadas. Se procede de la misma manera que anteriormente, por lo que se adjuntan las diez improntas realizadas en cada capa de la bicapa:

Capa	Bicapa 316L [½-½] (750 MPa)		Bicapa 316L [½-½] (550 MPa)		Bicapa 316L [⅔-⅓] (750 MPa)	
	316L [½]	Mezcla 316L [½]	316L [½]	Mezcla 316L [½]	316L [⅔]	Mezcla 316L [⅓]
Medición 1	109,5	234	130,4	188	178,8	202,6
Medición 2	212,3	168,2	138,4	186,2	119,4	135,4
Medición 3	203,9	157,6	201,3	170,2	109,2	134,3
Medición 4	95,7	209,5	127,4	213,6	172,8	173,9
Medición 5	81,1	91,1	110,8	100,2	97,7	95,1
Medición 6	122,2	117	113,6	253,4	147,1	134,7
Medición 7	165,2	206,7	130,8	224,3	159	168,2
Medición 8	181	218,2	149,6	168,7	117,9	164,2
Medición 9	127	99,1	126,7	148,8	145,5	240,8
Medición 10	81,5	80,6	105,1	110	96,4	117,3

Capa	Bicapa 430L [½-½] (750 MPa)		Bicapa 430L [⅔-⅓] (750 MPa)	
	430L [½]	Mezcla 430L [½]	430L [⅔]	Mezcla 430L [⅓]
Medición 1	188	203,3	180,5	221,2
Medición 2	168,2	269,1	125,1	161,3
Medición 3	178,8	210,2	201,3	148,8
Medición 4	174,4	183,9	132,2	157,1
Medición 5	138,8	140,3	70,7	90,1
Medición 6	192,3	234,8	142,6	160,8
Medición 7	152,6	184,5	169,7	160,4
Medición 8	143,8	214,5	115,9	163,2
Medición 9	168,2	234,8	160,4	163,2
Medición 10	133,6	172,3	100,7	84,3

Capa	Bicapa 50/50 [⅔-⅓] (750 MPa)		Bicapa Austenítica [½-½] (550 MPa)	
	50/50 [⅔]	Mezcla 50/50 [⅓]	316L [300-500 μm] [½]	316L [500-710 μm] [½]
Medición 1	222,7	246,1	229,9	148,8
Medición 2	228,3	157,1	225,9	226,7
Medición 3	215,2	250,6	222,7	186,2
Medición 4	176,6	271,1	229,8	152,6
Medición 5	129,4	119,4	99,5	148,9
Medición 6	176,1	214,5	204,6	236,5
Medición 7	179,4	238,2	222	229,1
Medición 8	160,8	254,3	179,9	271,1
Medición 9	218,2	164,7	252,2	275,3
Medición 10	63,4	148,3	178,2	136,2

Y se lleva a cabo el tratamiento estadístico de los mismos:

1. Se eliminan los dos valores más pequeños:

Capa	Bicapa 316L [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (750 MPa)		Bicapa 316L [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (550 MPa)		Bicapa 316L [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa)	
	316L [$\frac{1}{2}$]	Mezcla 316L [$\frac{1}{2}$]	316L [$\frac{1}{2}$]	Mezcla 316L [$\frac{1}{2}$]	316L [$\frac{2}{3}$]	Mezcla 316L [$\frac{1}{3}$]
Medición 1	109,5	234	130,4	188	178,8	202,6
Medición 2	212,3	168,2	138,4	186,2	119,4	135,4
Medición 3	203,9	157,6	201,3	170,2	109,2	134,3
Medición 4	95,7	209,5	127,4	213,6	172,8	173,9
Medición 5	122,2	117	113,6	253,4	147,1	134,7
Medición 6	165,2	206,7	130,8	224,3	159	168,2
Medición 7	181	218,2	149,6	168,7	117,9	164,2
Medición 8	127	99,1	126,7	148,8	145,5	240,8

Capa	Bicapa 430L [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (750 MPa)		Bicapa 430L [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa)	
	430L [$\frac{1}{2}$]	Mezcla 430L [$\frac{1}{2}$]	430L [$\frac{2}{3}$]	Mezcla 430L [$\frac{1}{3}$]
Medición 1	188	203,3	180,5	221,2
Medición 2	168,2	269,1	125,1	161,3
Medición 3	178,8	210,2	201,3	148,8
Medición 4	174,4	183,9	132,2	157,1
Medición 5	192,3	234,8	142,6	160,8
Medición 6	152,6	184,5	169,7	160,4
Medición 7	143,8	214,5	115,9	163,2
Medición 8	168,2	234,8	160,4	163,2

Capa	Bicapa 50/50 [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa)		Bicapa Austenítica [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (550 MPa)	
	50/50 [$\frac{2}{3}$]	Mezcla 50/50 [$\frac{1}{3}$]	316L [300-500 μ m] [$\frac{1}{2}$]	316L [500-710 μ m] [$\frac{1}{2}$]
Medición 1	222,7	246,1	229,9	148,8
Medición 2	228,3	157,1	225,9	226,7
Medición 3	215,2	250,6	222,7	186,2
Medición 4	176,6	271,1	229,8	152,6
Medición 5	176,1	214,5	204,6	236,5
Medición 6	179,4	238,2	222	229,1
Medición 7	160,8	254,3	179,9	271,1
Medición 8	218,2	164,7	252,2	275,3

2. Cálculo de la media, la varianza y la desviación típica:

Capa	Bicapa 316L [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (750 MPa)		Bicapa 316L [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (550 MPa)		Bicapa 316L [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa)	
	316L [$\frac{1}{2}$]	Mezcla 316L [$\frac{1}{2}$]	316L [$\frac{1}{2}$]	Mezcla 316L [$\frac{1}{2}$]	316L [$\frac{2}{3}$]	Mezcla 316L [$\frac{1}{3}$]
Media	152,1	176,29	139,78	194,15	143,71	169,26
Varianza	1976,26	2428,99	723,06	1168,12	682,01	1405,84
D. Típica	44,46	49,28	26,89	34,18	26,12	37,49

Capa	Bicapa 430L [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (750 MPa)		Bicapa 430L [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa)	
	430L [$\frac{1}{2}$]	Mezcla 430L [$\frac{1}{2}$]	430L [$\frac{2}{3}$]	Mezcla 430L [$\frac{1}{3}$]
Media	170,79	216,89	153,46	167
Varianza	272,69	820	873,81	501,47
Desviación típica	16,51	28,64	29,56	22,39

Capa	Bicapa 50/50 [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa)		Bicapa Austenítica [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (550 MPa)	
	50/50 [$\frac{2}{3}$]	Mezcla 50/50 [$\frac{1}{3}$]	316L [300-500 μ m] [$\frac{1}{2}$]	316L [500-710 μ m] [$\frac{1}{2}$]
Media	197,16	224,58	220,88	215,79
Varianza	699,12	1801,97	445,15	2383,13
Desviación típica	26,44	42,45	21,10	48,82

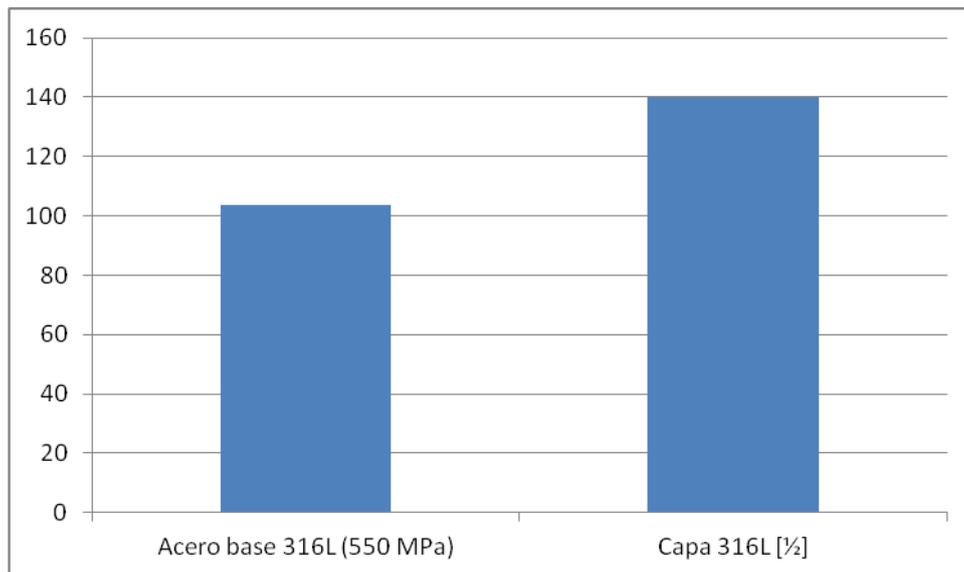
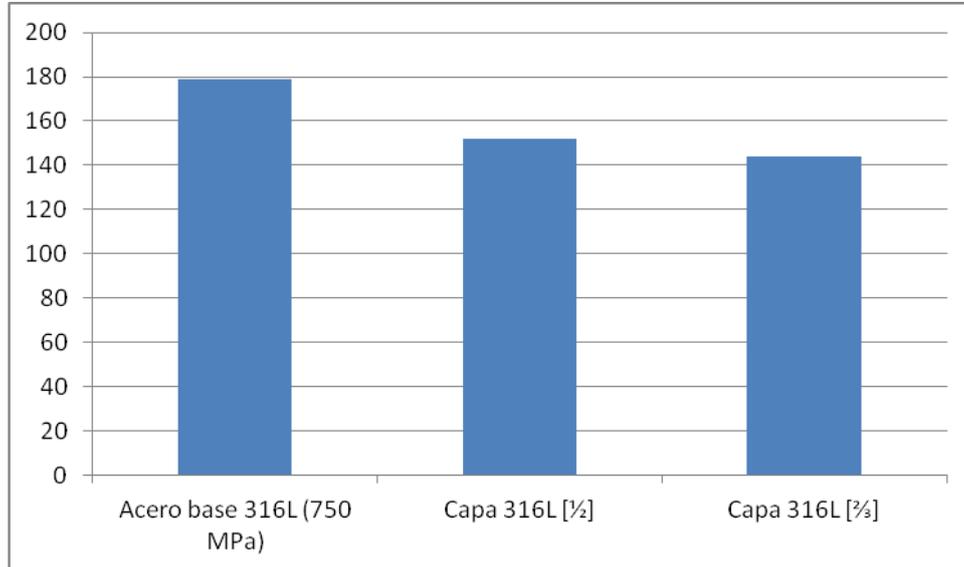
3. Desviaciones superiores e inferiores junto con la media aritmética:

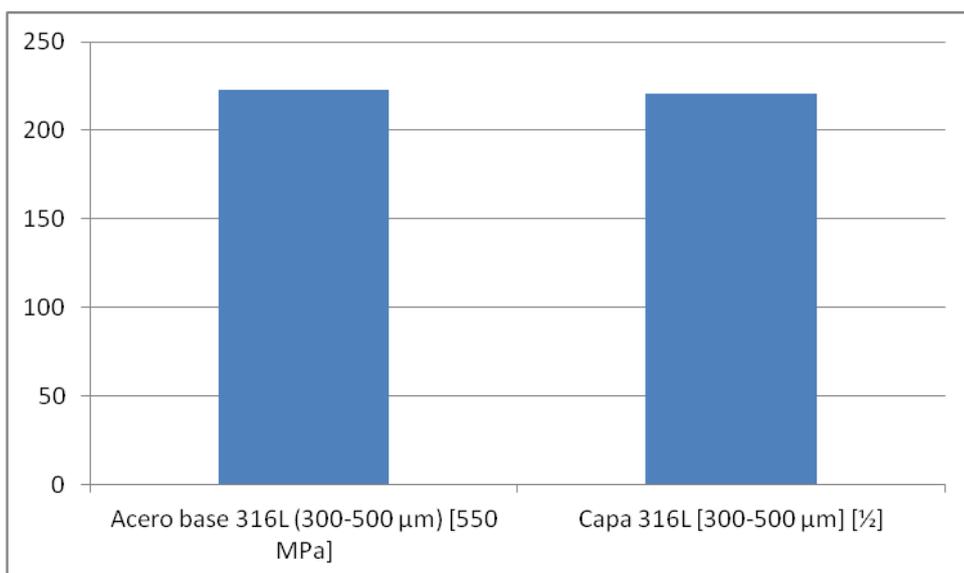
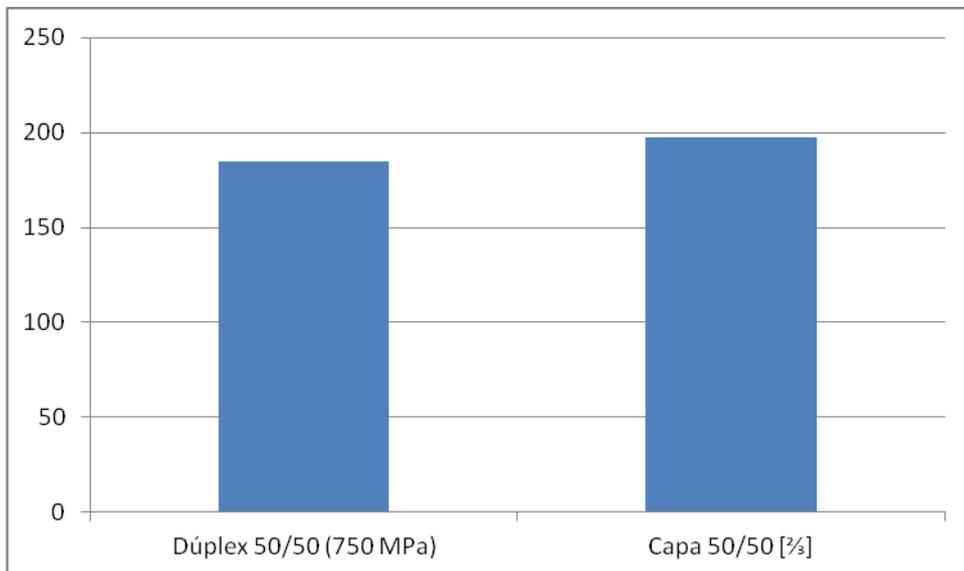
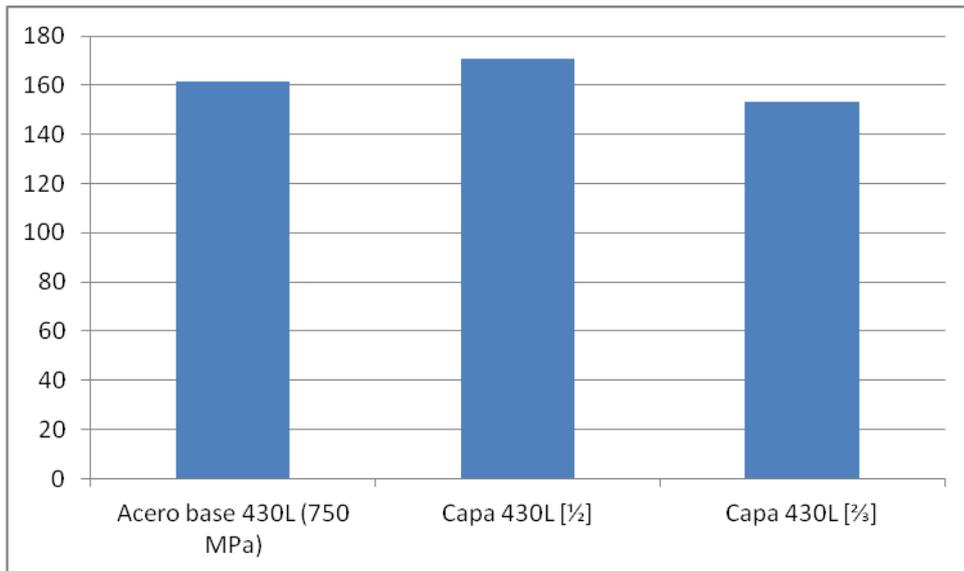
Capa	Bicapa 316L [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (750 MPa)		Bicapa 316L [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (550 MPa)		Bicapa 316L [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa)	
	316L [$\frac{1}{2}$]	Mezcla 316L [$\frac{1}{2}$]	316L [$\frac{1}{2}$]	Mezcla 316L [$\frac{1}{2}$]	316L [$\frac{2}{3}$]	Mezcla 316L [$\frac{1}{3}$]
D. Superior	196,56	225,57	166,67	228,33	169,83	206,75
Media	152,1	176,29	139,78	194,15	143,71	169,26
D. Inferior	107,64	127,01	112,89	159,97	117,59	131,77

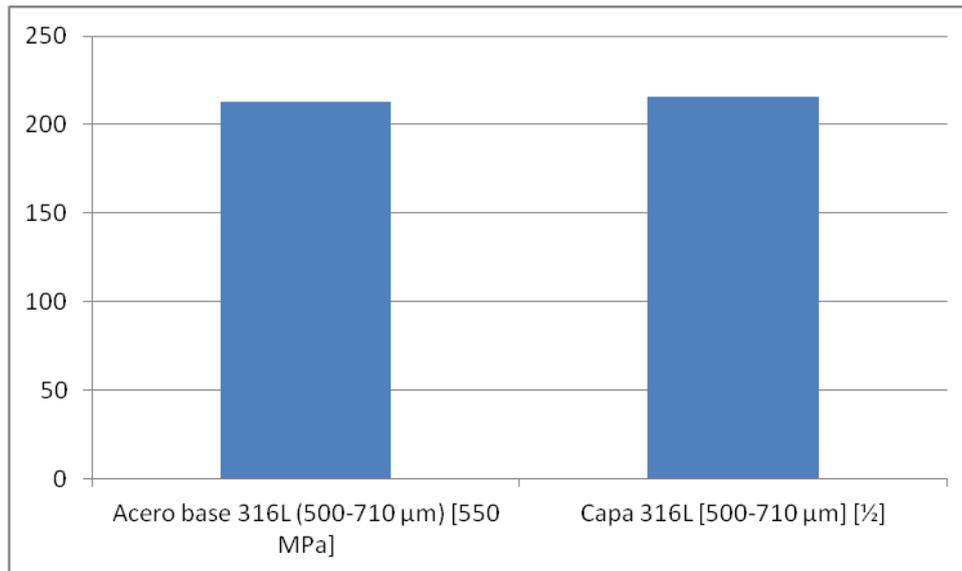
Capa	Bicapa 430L [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (750 MPa)		Bicapa 430L [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa)	
	430L [$\frac{1}{2}$]	Mezcla 430L [$\frac{1}{2}$]	430L [$\frac{2}{3}$]	Mezcla 430L [$\frac{1}{3}$]
D. Superior	187,3	245,53	183,02	189,39
Media	170,79	216,89	153,46	167
D. Inferior	154,28	188,25	123,9	144,61

Capa	Bicapa 50/50 [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa)		Bicapa Austenítica [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (550 MPa)	
	50/50 [$\frac{2}{3}$]	Mezcla 50/50 [$\frac{1}{3}$]	316L [300-500 μ m] [$\frac{1}{2}$]	316L [500-710 μ m] [$\frac{1}{2}$]
D. Superior	223,6	267,03	241,98	264,61
Media	197,16	224,58	220,88	215,79
D. Inferior	170,72	182,13	199,78	166,97

Para analizar la microdureza de las bicapas, en primer lugar se van a comparar las muestras de aceros base de referencia austenítico, ferrítico y dúplex con las capas de polvo atomizado por agua de las bicapas que en principio tienen idéntica composición, salvo la posible interdifusión de la mezcla y el ya observado ligero cambio en la presión de compactación.







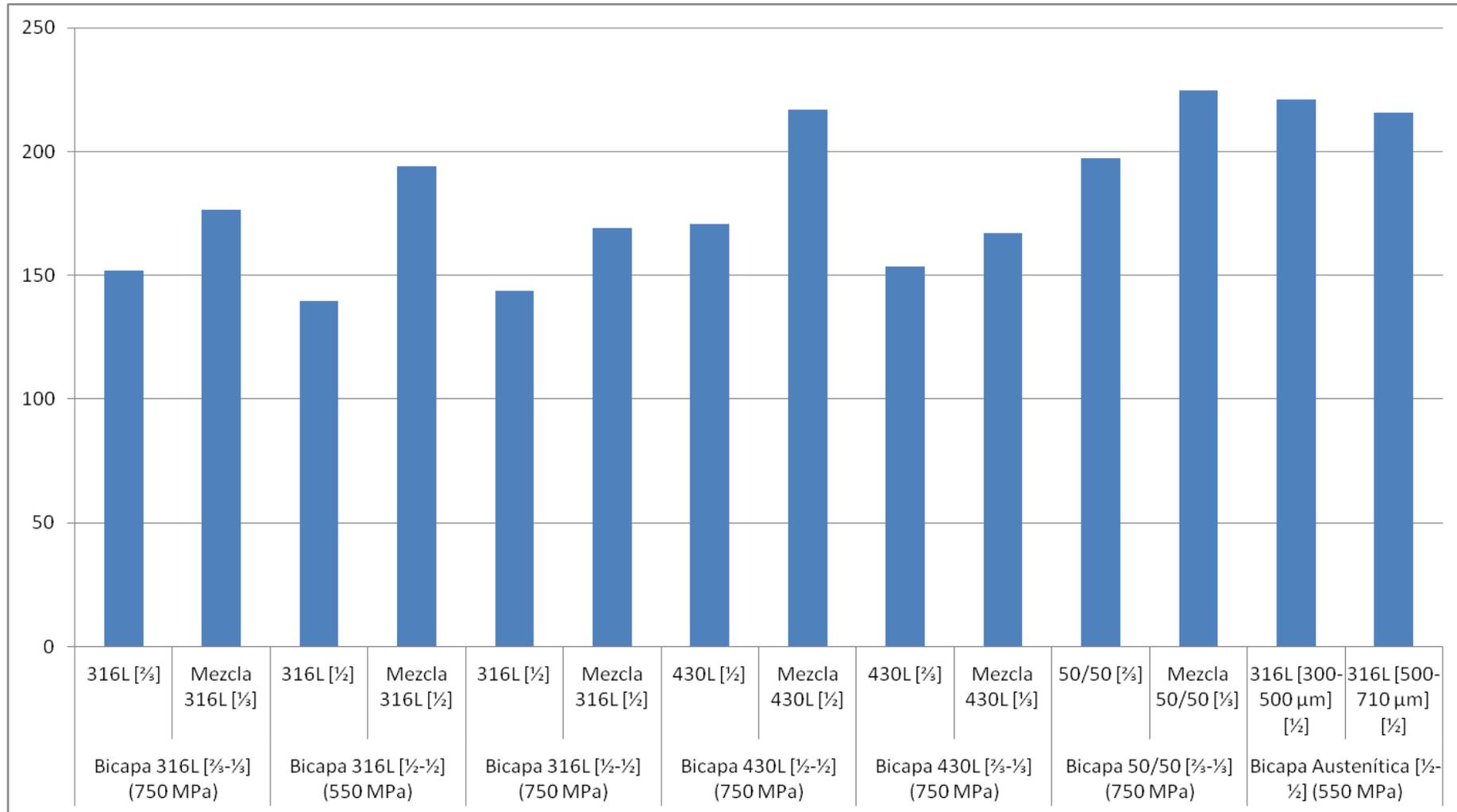
La capa de acero austenítico en las bicapas es ligeramente diferente a la del acero base. En la bicapa 316L ($\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$) compactada a 750 MPa se observa una dureza mayor que en la bicapa con menor cantidad de mezcla con polvo atomizado por gas; pero en ambos casos la dureza es menor que en el acero de referencia. Sin embargo en la misma bicapa, pero compactada a 550 MPa se observa que la microdureza de la capa atomizada por agua es sensiblemente mayor que en el acero base, al igual que en la capa de la mezcla, lo que significa que habrá cambios microestructurales fundamentalmente de variación de porosidad que explican estas ligeras diferencias.

En cuanto a las bicapas ferríticas, se observa que en ambas bicapas la microdureza de la capa atomizada por agua es similar a la del acero base, mientras que la de la capa de la mezcla es notoriamente más alta.

En el caso de las mezclas dúplex obtenidas a partir de polvos ferríticos y austeníticos se aprecia un ligero endurecimiento en la bicapa 50/50 con respecto al acero dúplex de referencia en las dos capas, pero es más significativo en la capa de la mezcla con polvo atomizado por gas.

Finalmente en cuanto a la Bicapa Austenítica, se observa que la microdureza de cada una de sus capas es prácticamente idéntica a la microdureza de los aceros base correspondientes.

A continuación y a modo de conclusión se establece una comparación gráfica de las bicapas, incluyendo las microdurezas de cada una de sus capas:





Se observa que en todos los casos la capa de la mezcla con polvos atomizados por gas presenta una dureza ligeramente superior al resto, a pesar de que como ya se ha comentado en un apartado anterior no haya sido observado un efecto de disminución de porosidad, con lo que debemos relacionar con un cambio a nivel de microconstituyentes. Este efecto lógicamente no se observa en las Mezcla Austenítica, en la cual no se han utilizado polvos atomizados por gas.

5.3.2 - ENSAYO DE MACRODUREZA

A continuación se exponen los resultados de macrodureza Vickers que se han obtenido para las probetas en estudio, siguiendo el método descrito.

El resultado expuesto es la media aritmética de tres improntas realizadas en la superficie de la muestra. Se seguirá un esquema similar en el análisis de resultados al utilizado en el apartado anterior.

5.3.2.1 - Aceros base

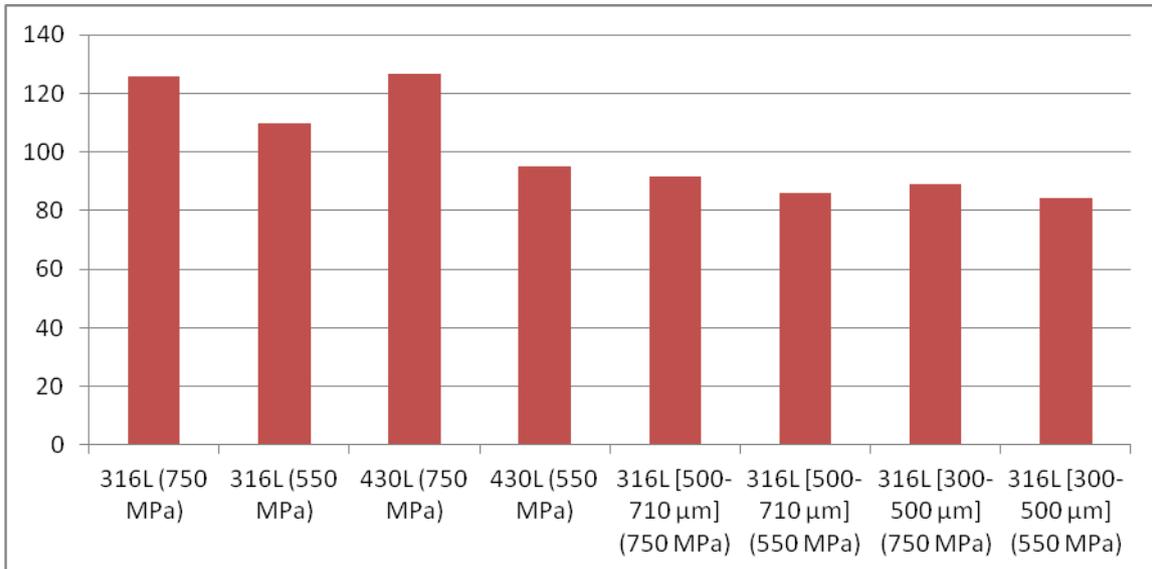
A continuación se exponen los resultados de macrodureza obtenidos para los dos aceros base (austenítico 316L y ferrítico 430L).

Muestra	Diagonal 1 (µm)	Diagonal 2 (µm)	HV	Media HV
316L (750 MPa)	670,6057	698,0304	123,7477894	125,7322719
	670,1279	684,983	126,2303407	
	665,2346	684,6022	127,2186855	
316L (550 MPa)	735,1014	735,5397	107,1766143	109,904498
	707,2754	725,068	112,9845679	
	719,3935	735,2144	109,5523121	
430L (750 MPa)	662,4817	676,2543	129,3372276	126,5475236
	675,1176	661,0866	129,8278206	
	678,3635	708,7235	120,4775227	
430L (550 MPa)	782,1946	761,8439	97,22930501	95,15846158
	791,2687	775,877	94,38319633	
	804,2293	767,254	93,8628834	
316L [500-710 µm] (750 MPa)	775,3191	785,3882	95,16352228	91,59478017
	795,933	831,7534	87,49272883	
	758,6282	827,5818	92,1280894	
316L [500-710 µm] (550 MPa)	806,0029	858,8723	83,62768283	86,04255522
	800,6247	811,3173	89,21021976	
	808,1158	840,4575	85,28976308	
316L [300-500 µm] (750 MPa)	789,2913	797,4685	92,06425712	88,92459227
	813,8099	837,5388	85,00331324	
	797,9483	809,5313	89,70620645	
316L [300-500 µm] (550 MPa)	771,2504	838,9424	89,40414843	84,08759146
	786,2332	827,8124	88,97783435	
	844,8229	926,4723	73,88079161	

Se observa que hay una gran diferencia al comparar los aceros base de tamaño estándar de granos con los aceros base de tamaño de grano más grueso. Sin embargo, al contrario que lo que ocurría en la microdureza, aquí la macrodureza disminuye considerablemente. Esto debe lógicamente relacionarse con el mayor grado de porosidad observado en estas muestras, fenómeno al que resulta especialmente sensible el ensayo de macrodureza.

Comparando exclusivamente los aceros austeníticos y ferríticos con tamaño de grano estándar, se observa que a 750 MPa de presión de compactación la macrodureza es muy similar para ambas composiciones, mientras que al compactar a 550 MPa el austenítico es más duro. El efecto beneficioso de la mayor presión de compactación para las composiciones es obvio. Las muestras compactadas a mayor presión que son menos porosas y con poros más pequeños tienen mayor dureza que las compactadas a 550MPa.

En el caso de las muestras obtenidas a partir de polvos de acero con grano grueso e intermedio el efecto de la presión de compactación es menor aunque en idéntico sentido. En estos casos se observa que cuanto mayor es el grado de porosidad como consecuencia de utilizar un tamaño de partícula más grueso o una presión de compactación más baja menor es la macrodureza registrada.



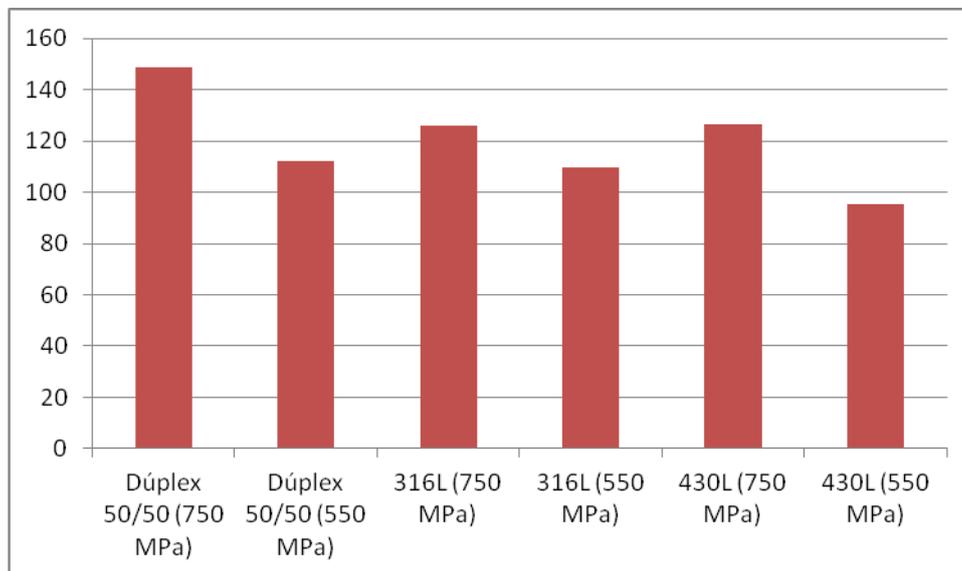
5.3.2.2 - Mezclas

En la tabla se muestran los resultados obtenidos para las diferentes mezclas a distinta presión de compactación:

Muestra	Diagonal 1 (μm)	Diagonal 2 (μm)	HV	Media HV
Dúplex 50/50 (750 MPa)	625,9678	636,6074	145,4115563	148,6063724
	611,7273	621,05	152,5261029	
	622,9571	629,03	147,8814579	
Dúplex 50/50 (550 MPa)	741,924	727,4292	107,364579	112,3253578
	709,7538	727,6446	112,1912837	
	687,5771	717,4519	117,4202106	
Mezcla Austenítica (750 MPa)	754,4505	828,3692	92,5231772	92,14778228
	802,8936	839,9629	85,88437723	
	740,0749	797,5995	98,0357924	
Mezcla Austenítica (550 MPa)	814,4583	863,3401	82,34436405	83,11117962
	820,1444	882,3987	79,96817812	
	811,9852	820,107	87,02099669	

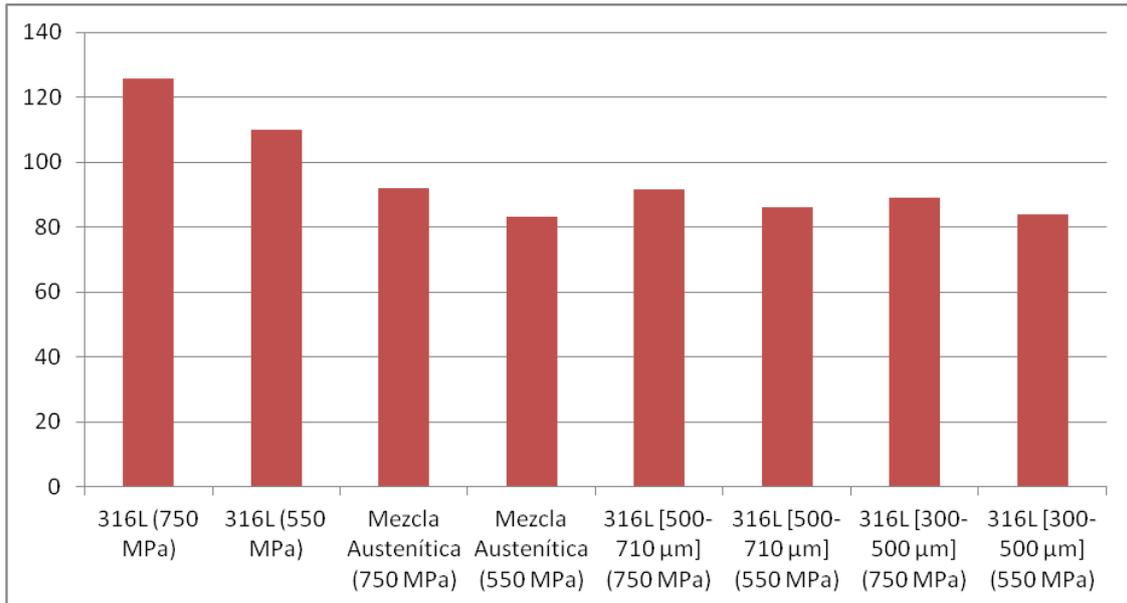
En coincidencia con los resultados del ensayo de microdureza se observa que las mezclas dúplex dan lugar a datos de macrodureza superiores a la de los aceros ferríticos y austeníticos de partida, siendo especialmente intenso el reforzamiento para la muestra compactada a mayor presión.

A continuación se adjunta un gráfico comparando la macrodureza de los aceros base con tamaño de grano estándar y de los aceros dúplex:



Al igual que ocurría en el análisis de la microdureza, se puede observar que el Dúplex 50/50 compactado a 750 MPa tiene una macrodureza más elevada que el resto de los aceros, y como se señaló anteriormente, dicho acero Dúplex mejora las propiedades mecánicas como consecuencia del menor grado de compactación y de la mezcla de aceros, por lo que se puede afirmar que este acero es mejor que todos los obtenidos a partir de polvos de tamaño de partícula estándar.

Posteriormente se compara la Mezcla Austenítica con el acero base 316L obtenido a partir de polvos con diferentes tamaños de grano:

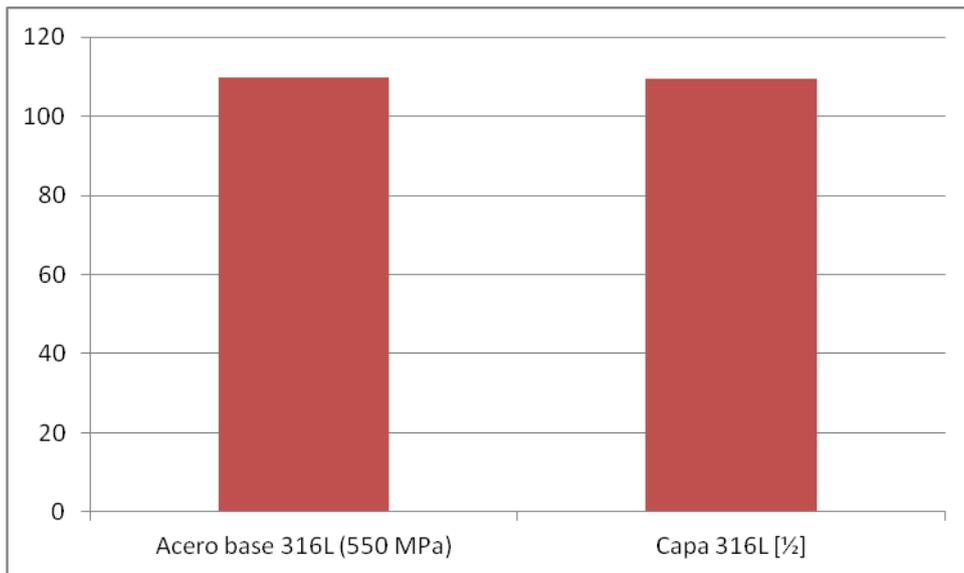
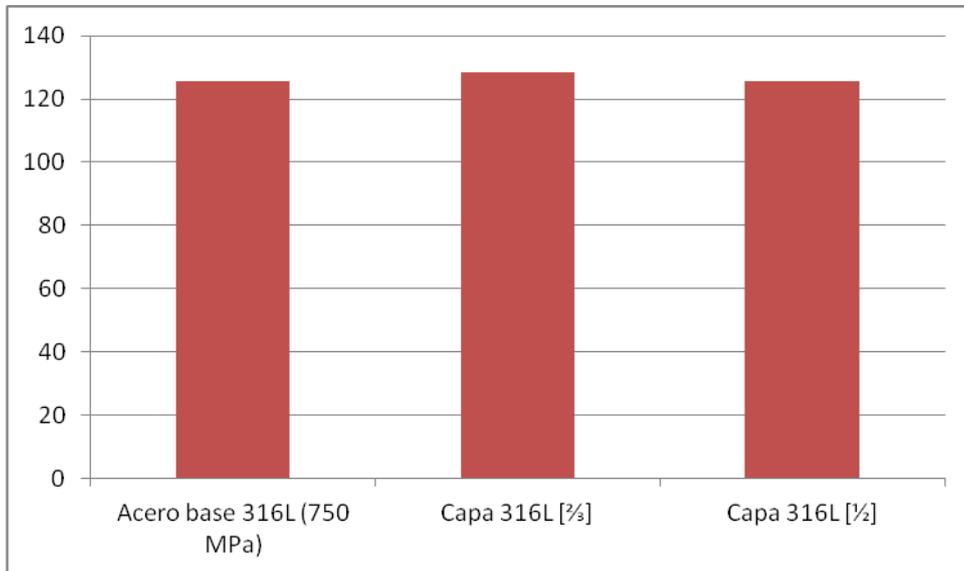


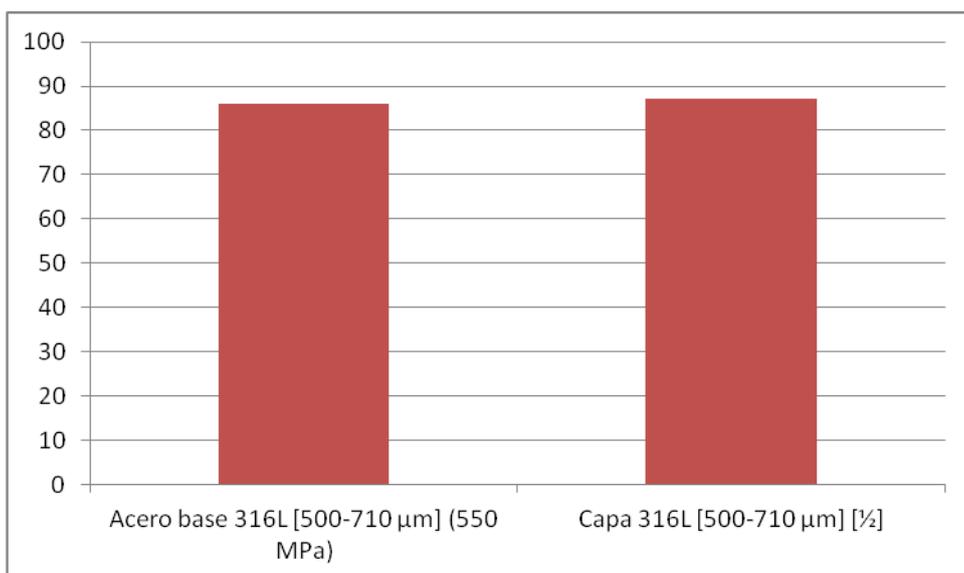
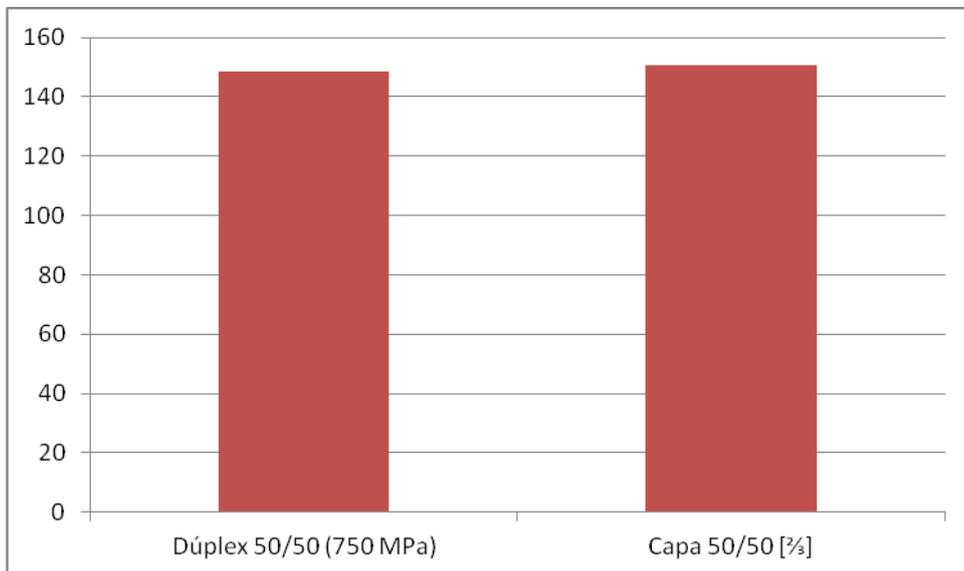
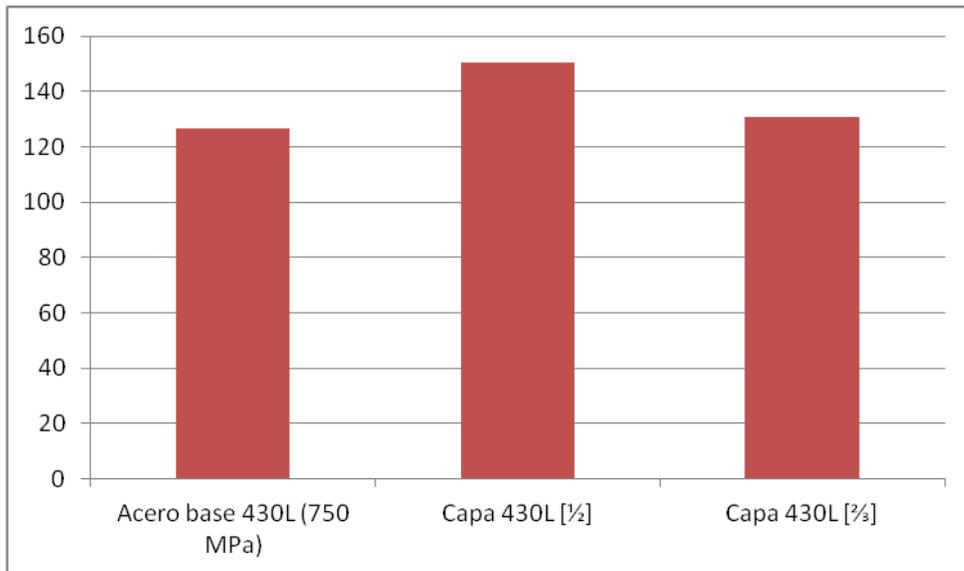
Se aprecia que entre la Mezcla Austenítica y el acero base con tamaño de grano grueso apenas hay diferencias, al igual que ocurría con la microdureza, incluso a ambas presiones de compactación. Donde sí hay una gran diferencia es como ya se ha comentado a la hora de compararla con el acero base con tamaño de grano estándar, siendo la macrodureza en todos los casos mayor para el acero obtenido con menor tamaño de partícula por su menor porosidad.

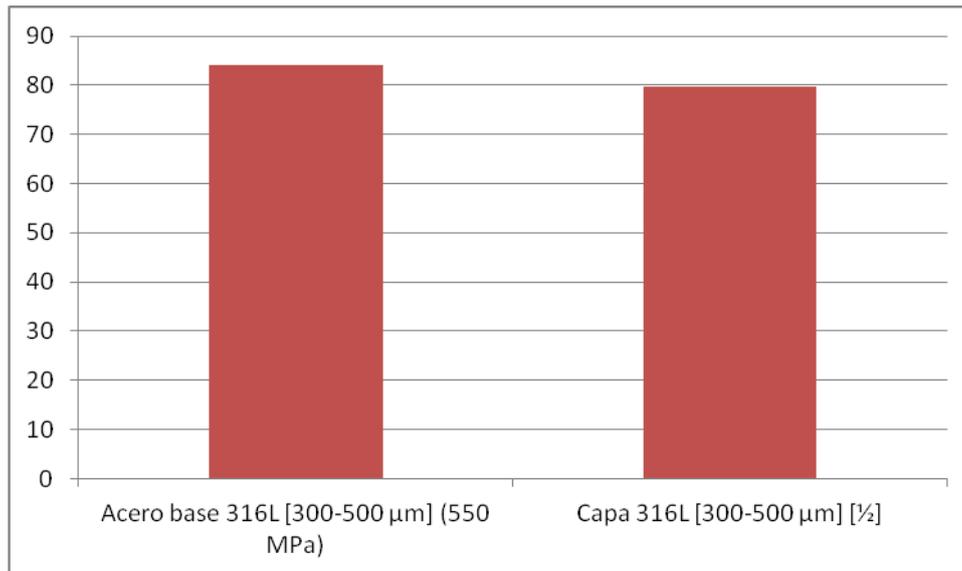
5.3.2.3 - Bicapas

Muestra	Capa	Diagonal 1 (μm)	Diagonal 2 (μm)	HV	Media HV
Bicapa 316L [½-½] (750 MPa)	316L [½]	660,3861	650,6812	134,8538844	128,393271
		680,5275	672,4584	126,6271669	
		694,2615	674,6458	123,6987619	
	Mezcla 316L [½]	675,9715	670,9186	127,7759475	127,4917186
		680,3478	661,5836	128,7220067	
		689,8991	666,5726	125,9772015	
Bicapa 316L [½-½] (550 MPa)	316L [½]	726,5528	742,3863	107,4251205	109,3883246
		721,4802	737,8358	108,8465688	
		709,8323	729,4789	111,8932844	
	Mezcla 316L [½]	724,102	756,5617	105,7305699	108,7277063
		716,1415	739,1019	109,4566507	
		712,3293	732,7885	110,9958984	
Bicapa 316L [⅔-⅓] (750 MPa)	316L [⅔]	693,7794	671,3824	124,3784605	125,6519451
		686,3596	661,5836	127,5763719	
		675,3188	686,4393	125,0010028	
	Mezcla 316L [⅓]	693,5127	698,1978	119,6783585	124,6571491
		678,9572	673,2146	126,7796893	
		667,1537	681,1223	127,5133994	
Bicapa 430L [½-½] (750 MPa)	430L [½]	601,0377	654,2776	147,0983453	150,5144694
		585,3544	647,3796	152,5368181	
		584,4791	650,8027	151,9082449	
	Mezcla 430L [½]	605,9438	626,7154	152,5553311	151,6370495
		593,4337	632,4839	154,2378176	
		602,7892	648,1978	148,1179997	
Bicapa 430L [⅔-⅓] (750 MPa)	430L [⅔]	669,3644	663,3438	130,5098504	130,7422521
		667,2609	668,3895	129,9355038	
		658,5659	667,6971	131,7814021	
	Mezcla 430L [⅓]	635,2713	635,2713	143,5935622	140,7717095
		644,7541	625,5513	143,6471927	
		660,4903	649,5065	135,0743736	
Bicapa 50/50 [⅔-⅓] (750 MPa)	50/50 [⅔]	607,5523	628,4097	151,7410884	150,4985096
		609,2181	629,2861	151,1187888	
		590,9607	657,846	148,6356516	
	Mezcla 50/50 [⅓]	606,5709	630,022	151,5862936	155,3498023
		599,1104	595,3645	162,4648355	
		624,2206	610,6953	151,9982777	
Bicapa Austenítica [½-½] (550 MPa)	316L [300-500 μm] [½]	805,8932	835,0394	86,08588437	79,62403161
		866,498	893,2838	74,85068652	
		875,4523	849,1501	77,93552393	
	316L [500-710 μm] [½]	799,0172	801,3134	90,5094681	87,09784339
		862,0992	831,0226	80,86061284	
		820,6921	784,8446	89,92344925	

Para analizar la macrodureza de las bicapas, se van a comparar las muestras de aceros base: austenítico, ferrítico y dúplex con las capas obtenidas a partir de polvos atomizadas por agua de las bicapas que poseen, por tanto, idéntica naturaleza:



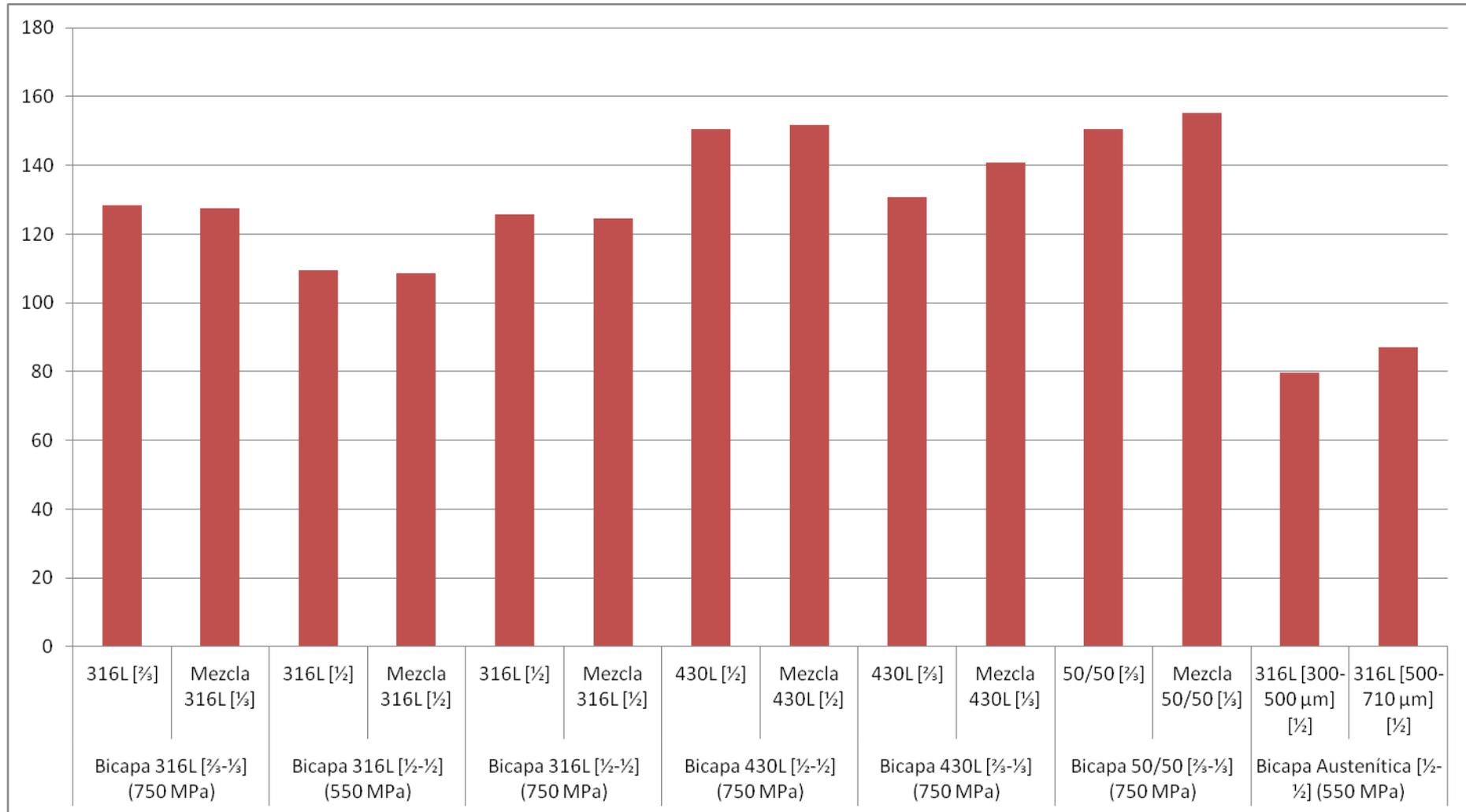




Se observa que prácticamente en todos los casos la capa integrada exclusivamente por polvo atomizado por agua tiene una macrodureza muy similar, cuando no casi idéntica, a la del acero base correspondiente, como era previsible.

A diferencia de lo que ocurría en el caso de la microdureza, tampoco existen diferencias notables entre la capa de la mezcla obtenida con polvos atomizados por gas y la obtenida exclusivamente por polvos atomizados en agua. Sin embargo sí se aprecian diferencias más notables entre los materiales en función de su composición.

A continuación se establece una comparación gráfica de las bicapas, incluyendo las macrodurezas de cada una de sus capas, donde se observa que la macrodureza de ambas capas de cada bicapa es muy pareja:





En base al gráfico anterior podemos concluir que a nivel de macrodureza también en las bicapas compactadas a mayor presión se observa un efecto endurecedor claramente observable en todas las bicapas austeníticas, siendo mucho más evidente en la bicapa de la mezcla austenítica en la que hemos observado porosidades mucho más elevadas y mayor reducción cuando se aplica una mayor presión de compactación. A nivel de macrodureza destaca la mayor dureza de las bicapas con acero ferrítico, mientras que a nivel de microdureza también se observaba especialmente en la capa de la mezcla. También los resultados coinciden con los de microdureza en mostrar el efecto endurecedor de la mezcla de polvos ferríticos y austeníticos no solo en los aceros base sino también en las bicapas.

5.4 - COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO

5.4.1 - ENSAYO DE DESGASTE SECO

5.4.1.1 - Aceros base

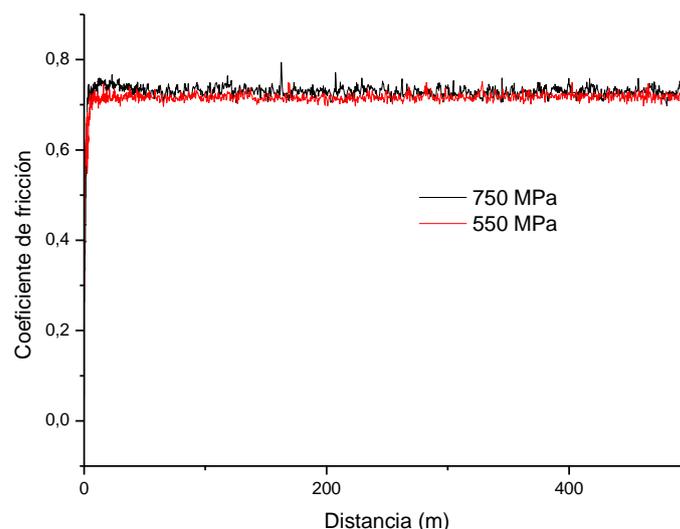
Se ha realizado el ensayo de desgaste seco para los aceros base, buscando sobretodo una referencia a la hora de evaluar el comportamiento de las bicapas, ya que las mismas estarán compuestas por dos capas y una de ellas tendrá la misma composición que los aceros base atomizados por agua. También se ha buscado una comparación entre las muestras de acero 316L de diferente tamaño de grano. Es igualmente interesante conocer el efecto de la composición química y de las mezclas en el comportamiento frente al desgaste.

En este análisis se ha tratado de analizar la variación del coeficiente de fricción y la penetración para distintas circunstancias.

Debido a los resultados que se han obtenido al evaluar la porosidad, se ha considerado hacer un análisis más exhaustivo del comportamiento frente al desgaste de los aceros inoxidables austeníticos con tamaños de grano más gruesos que los estándar con objeto de evaluar el efecto de la porosidad en el desgaste. También se ha analizado el efecto de la presión de compactación en el comportamiento frente al desgaste.

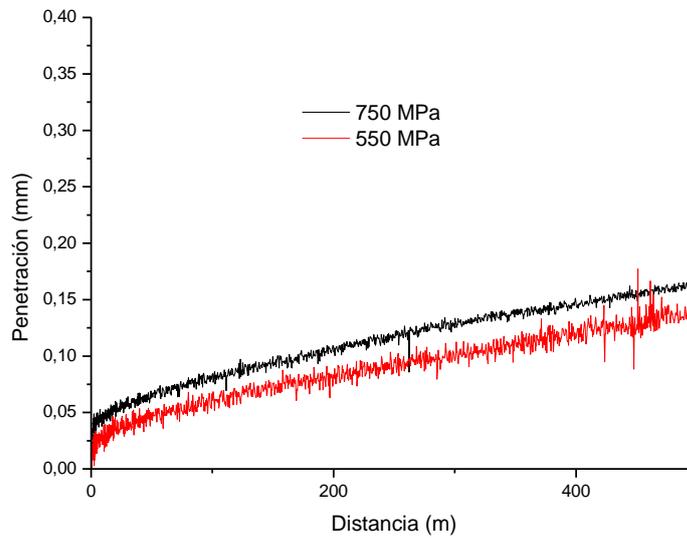
316L [500-710 μm]

Realizando el ensayo con las muestras de tamaño de grano grueso a diferentes presiones de compactación se obtienen los siguientes resultados:



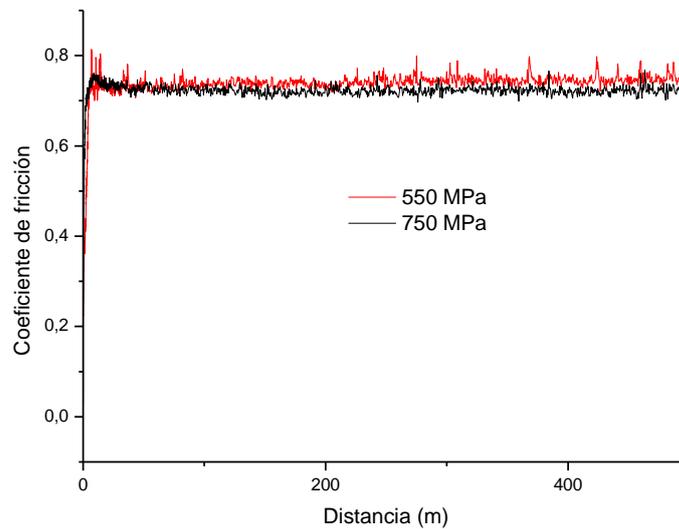
No hay diferencias entre las dos presiones de compactación en el coeficiente de fricción. En los dos casos esta en torno a 0.7.

En cuanto a la penetración hay una ligera diferencia, pero son muy similares, la penetración máxima alcanza los 0.15 mm.

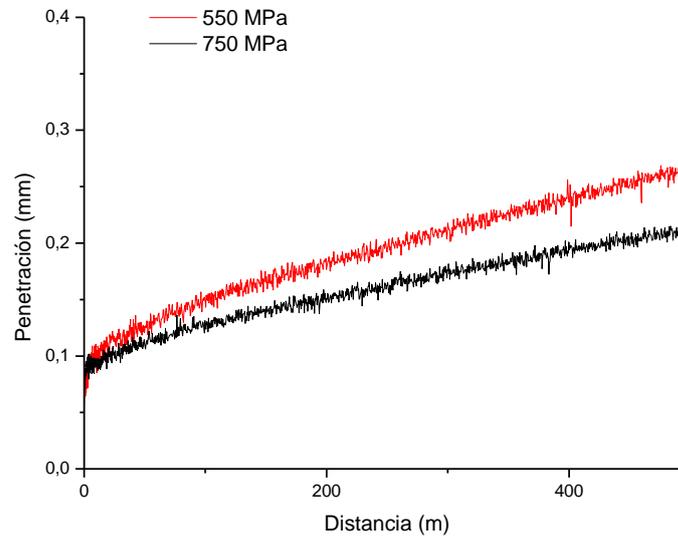


316L [300-500 μm]

En las muestras con tamaño de grano intermedio (300-500 μm) se observa que el coeficiente de fricción es idéntico en ambos casos y de valor igual al de grano grueso, por encima de 0.7.



En este caso se observa que la muestra con menor presión de compactación tiene ligeramente más penetración que la compactada a mayor presión especialmente para mayores tiempos de ensayo.

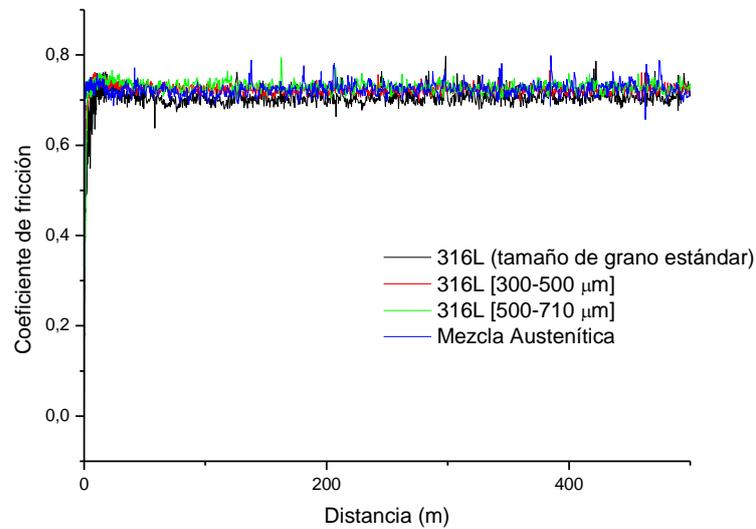


5.4.1.2 - Mezclas

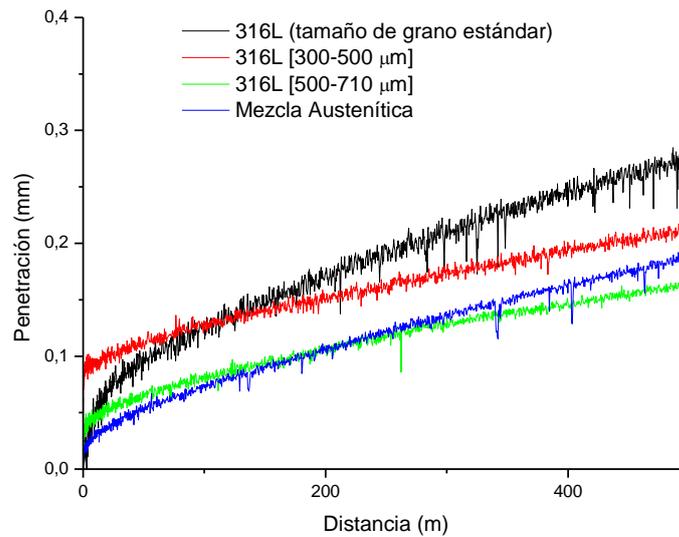
Mezcla Austenítica

Relacionado con las muestras que se acaban de analizar, también se ha realizado el ensayo de desgaste seco a la Mezcla Austenítica, y se la va a comparar con las muestras de aceros base con diferentes tamaños de grano.

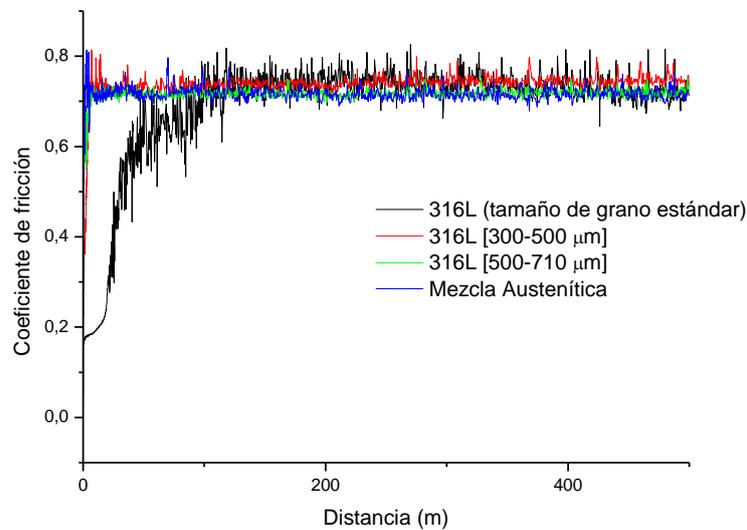
A la presión de 750 MPa se ha comparado la Mezcla Austenítica con las muestras de tamaño de grano estándar, grueso e intermedio. El coeficiente de fricción es semejante en todos los casos:



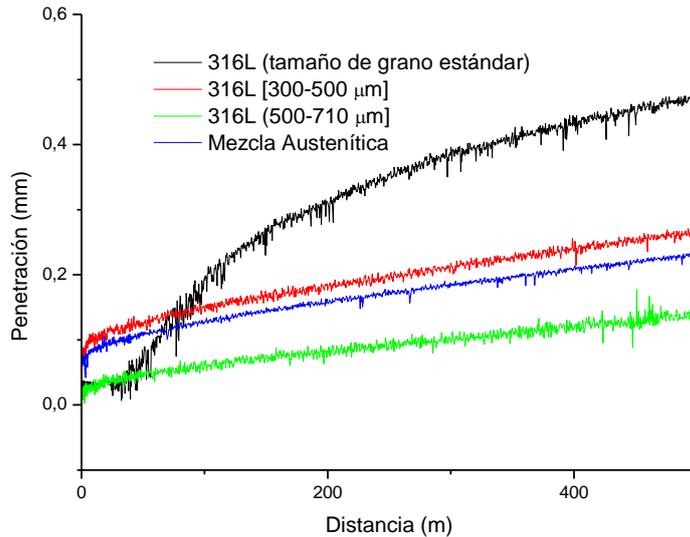
En cuanto a la penetración sí que hay una diferencia: en la muestra de grano estándar más fino es la que presenta mayor penetración. A continuación la de grano intermedio y finalmente la de menor penetración y por tanto mayor resistencia al desgaste seco es el material más poroso elaborado con polvo de acero austenítico más grueso. La Mezcla Austenítica tiene también muy buen comportamiento frente al desgaste. La más porosa, la de grano grueso, es no obstante la que tiene menor penetración que la mezcla.



Se ha hecho la misma comparación con la mezcla austenítica compactada a 550 MPa y, como ocurrió a la otra presión de compactación, se observa que el coeficiente de fricción es idéntico en todas, y sólo se observan en el acero de grano estándar elaborados con el polvo más fino menores coeficientes de fricción en las primeras etapas del ensayo.



En la penetración sí se observan diferencias más notables, al igual que para la mayor presión de compactación se observa que el acero convencional con polvo más fino tiene una penetración muy superior al resto y, una vez más, el acero elaborado con polvo de acero más grueso es el que presenta mayor resistencia al desgaste. Por tanto se observa una mejora claramente cuanto mayor es el grado de porosidad, la mezcla tiene un comportamiento intermedio como era de esperar, aunque en este caso muestra mayor similitud con el acero de grano intermedio.



5.4.1.3 - Bicapas

Bicapas 316L

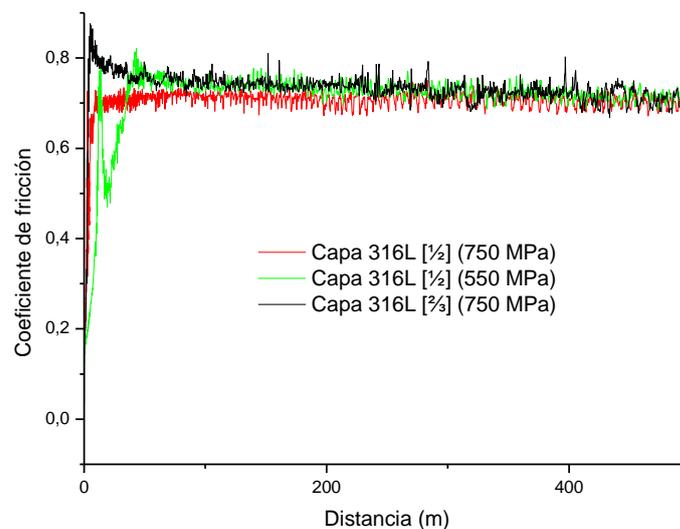
En el caso de las bicapas austeníticas se han realizado ensayos sobre las tres disponibles en el caso del acero austenítico:

- Bicapa 316L [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (750 MPa)
- Bicapa 316L [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (550 MPa)
- Bicapa 316L [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa)

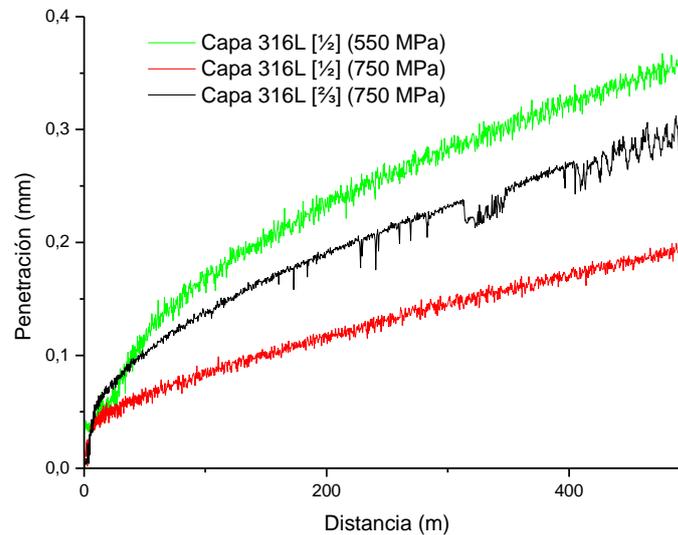
El análisis que se ha realizado ha sido por capas, evaluando el comportamiento primeramente de la capa de atomizado por agua y a continuación la capa de la mezcla.

Capa 316L:

El coeficiente de fricción es similar en todos los casos para la capa obtenida a partir de polvo atomizado en agua. En el caso de la muestra compactada a menos presión hay menos estabilidad al principio del ensayo, pero después es similar a las demás. El coeficiente está en torno a 0.7, similar al máximo alcanzado por el material base de referencia.

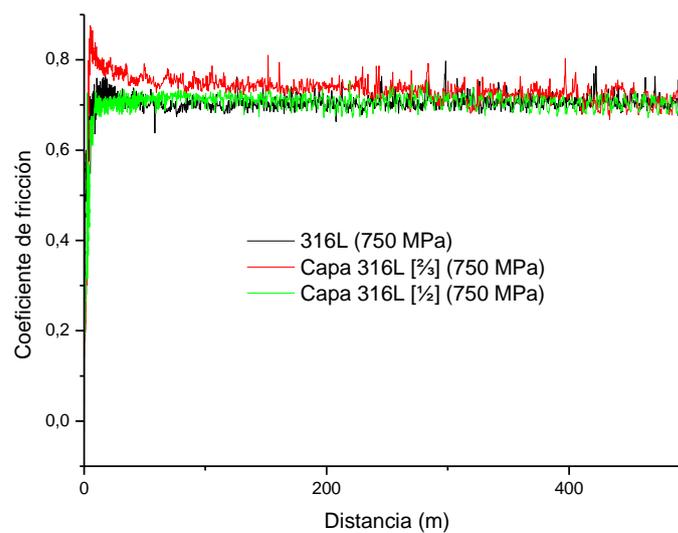


En cuanto a la penetración sí que se observan más diferencias. La muestra compactada a menos presión es la que claramente presenta mayor penetración durante todo el ensayo, y de las muestras compactadas a la misma presión, se observa que la de proporción $[\frac{1}{2}-\frac{1}{2}]$ tiene menos penetración que la de proporción $[\frac{2}{3}-\frac{1}{3}]$, con menor cantidad de mezcla con polvo de acero atomizado por gas.

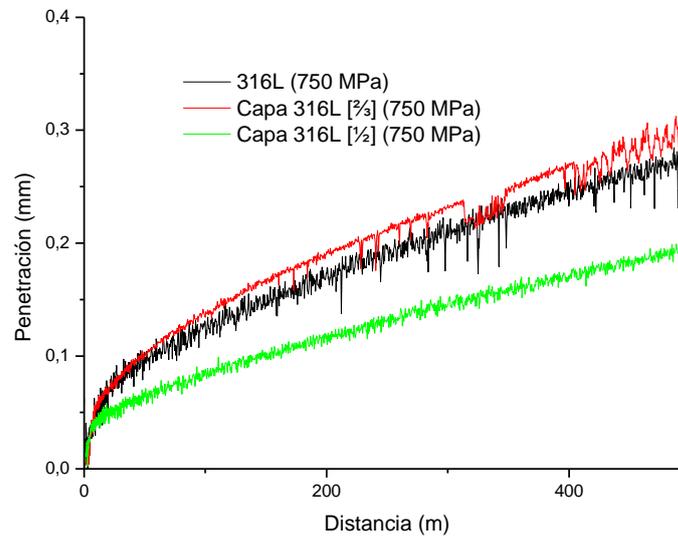


Esta capa también se va a comparar con los aceros base según la presión de compactación:

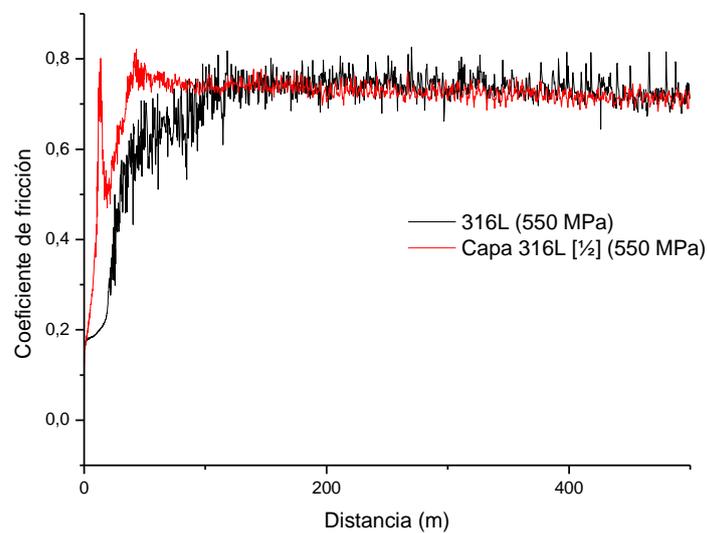
A 750 MPa los coeficientes de fricción son idénticos en las dos bicapas, y en el acero base es de 0.7.



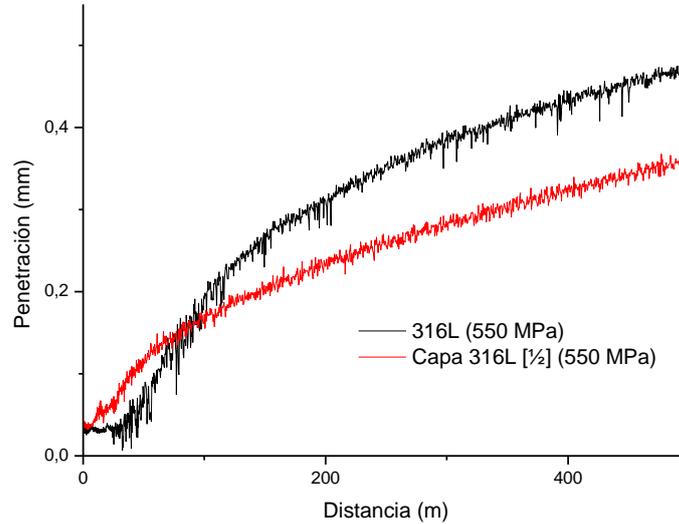
En cuanto a la penetración, es similar en el acero base y en la bicapa con menor cantidad de mezcla, la bicapa con mayor cantidad de mezcla, proporción [½-½], es la que presenta menor penetración.



A 550 MPa el coeficiente de fricción se estabiliza en el mismo valor, por encima de 0.7 y tanto en el acero base como en la bicapa hay variaciones en las primeras fases del ensayo.

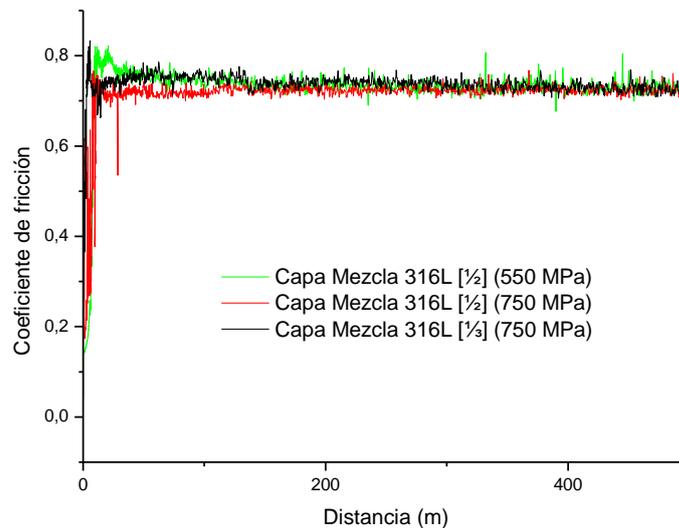


En la penetración sí existen diferencias y se observa que en la capa de la bicapa hay menor penetración que en el acero base, como ya ocurría para la mayor presión de compactación.

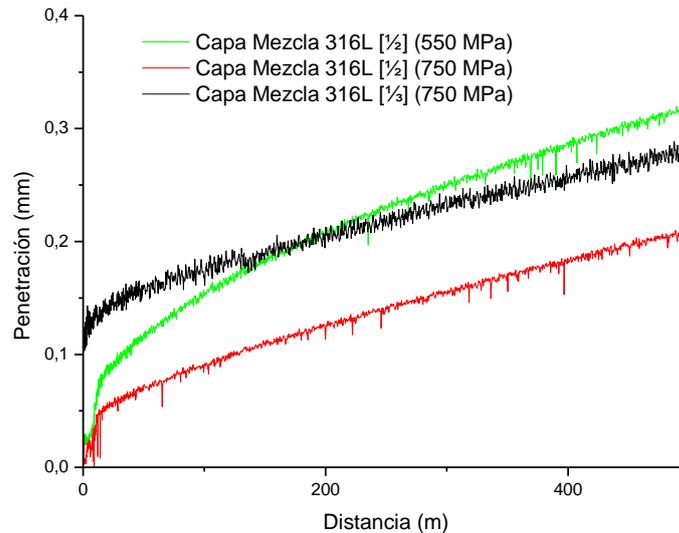


Capa Mezcla 316L:

El coeficiente de fricción es parecido en todos los casos, aproximadamente 0.7; coincidiendo este dato también con el obtenido en la capa de polvo de acero atomizado en agua.



La penetración se modifica con la presión de compactación como ya ocurría en el caso de la capa de acero atomizado en agua. Se observa que la penetración a la menor presión de compactación, 550 MPa, es mayor, y similar a la otra capa atomizada por agua, mientras que cuando la muestra es compactada a 750 MPa la penetración es menor. En cuanto a la influencia del tipo de bicapa se observa que la bicapa con mayor cantidad de mezcla, esto es, la de proporción [½- ½] es la que presenta menor penetración, al igual que ocurría en el caso de la otra capa de la bicapa.



Bicapas 430L

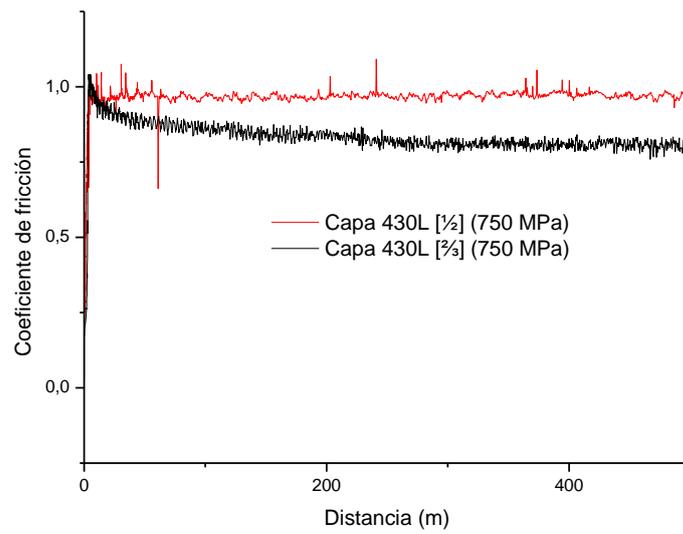
En el caso de las bicapas ferríticas se han realizado ensayos sobre las dos disponibles, ambas a la presión de 750MPa:

- Bicapa 430L [½-½] (750 MPa)
- Bicapa 430L [⅓-⅓] (750 MPa)

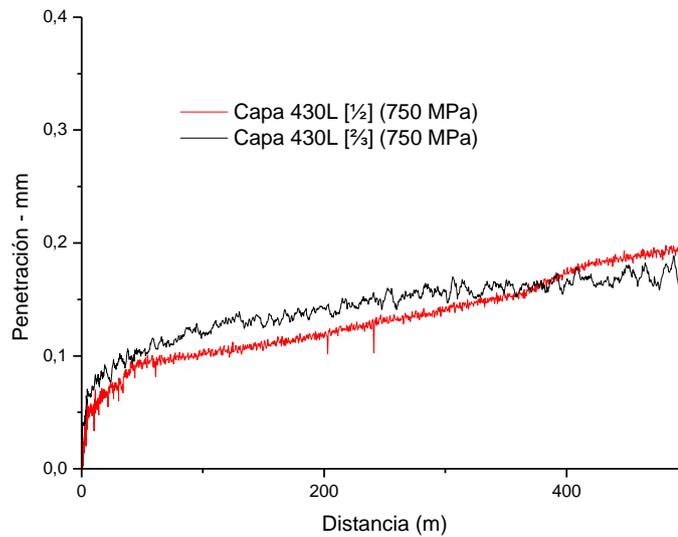
Se ha realizado un análisis por capas, y también se ha comparado la capa atomizada por agua con el acero base 430L.

Capa 430L:

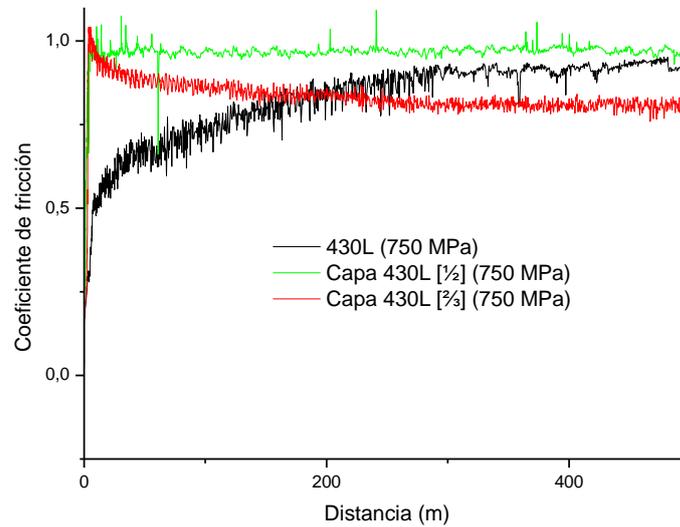
En la comparación del coeficiente de fricción se aprecian más diferencias que en casos anteriores, siendo el de la capa de la bicapa con proporción [⅓-⅓] más bajo. También se observa que el coeficiente de fricción es más elevado que en la bicapa correspondiente de acero austenítico.



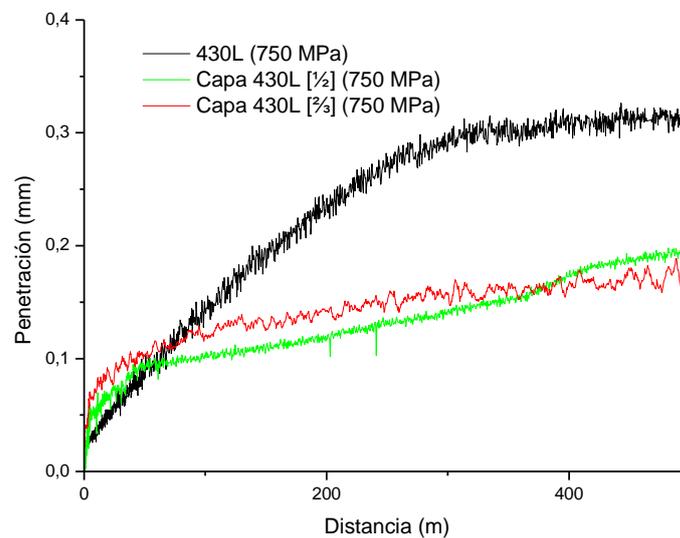
Las penetraciones en ambas capas son muy similares, y son ligeramente más reducidas que en las correspondiente bicapas de acero inoxidable austenítico pese a la mayor fricción señalada anteriormente.



En el estudio comparativo con los aceros base se observa que en cuanto al coeficiente de fricción, hay más diferencias que en otros casos. El coeficiente de fricción se estabiliza antes que en los aceros base, pero luego todos los valores son muy altos. El de menor valor es el de la bicapa con proporción $[\frac{2}{3}-\frac{1}{3}]$ que decrece ligeramente a medida que evoluciona el ensayo.

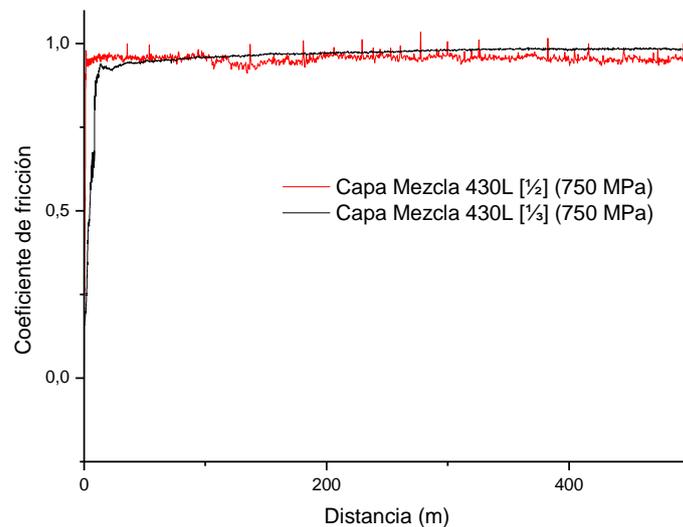


En lo referente a la penetración, las bicapas tienen claramente mejor comportamiento frente al desgaste que el acero base en el caso de los aceros ferríticos.

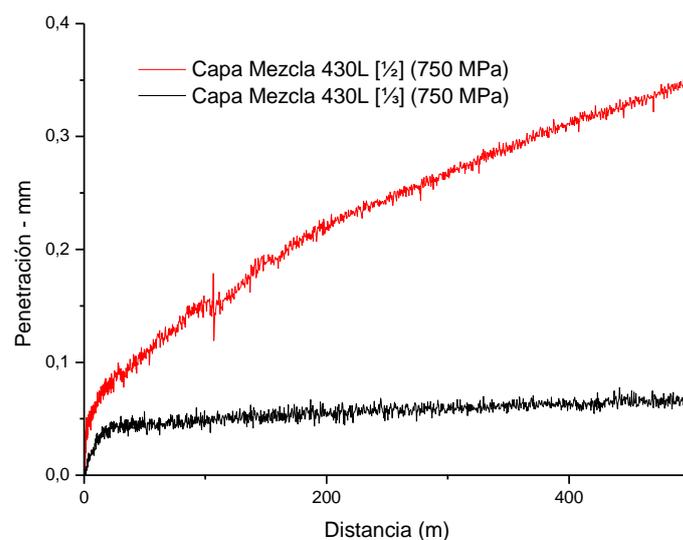


Capa Mezcla 430L

El coeficiente de fricción es bastante más elevado que los de las bicapas 316L, muy cercano a la unidad, que es lo que se obtenía también en el acero base y en las capa de acero atomizado por agua de la bicapa. Además se aprecia que es muy similar en las capas de la mezcla de ambas bicapas, ligeramente más bajo el de la capa de la bicapa de proporción $[\frac{1}{2}-\frac{1}{2}]$.

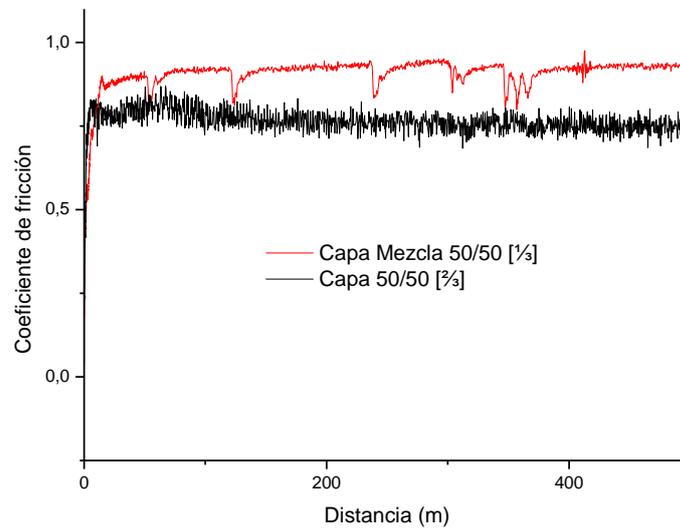


En cuanto a la penetración, se aprecia una clara diferencia entre las dos bicapas: mientras que en la de proporción $[\frac{2}{3}-\frac{1}{3}]$ la penetración es muy baja durante todo el ensayo en la capa de la mezcla, en la capa de la bicapa de proporción $[\frac{1}{2}-\frac{1}{2}]$ aumenta considerablemente. Luego en este caso la adición de mayor cantidad de mezcla da lugar a mayor penetración.

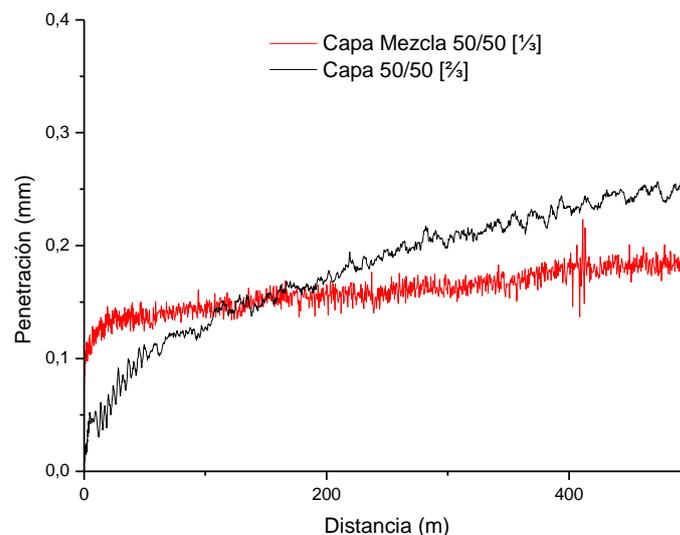


Bicapa 50/50 [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa)

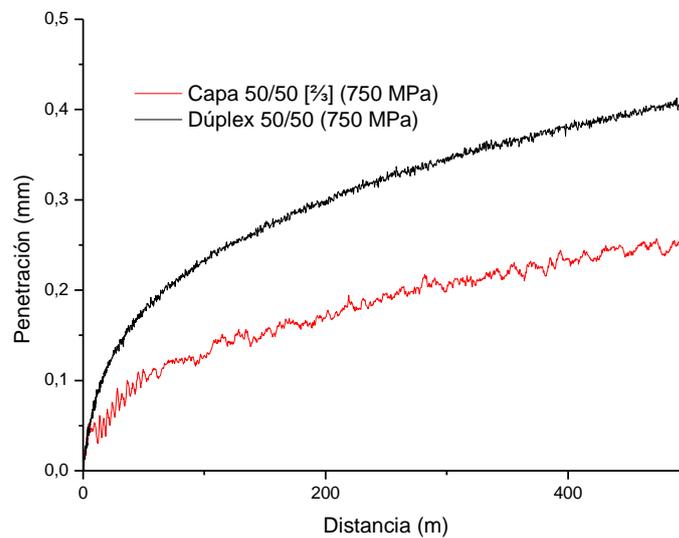
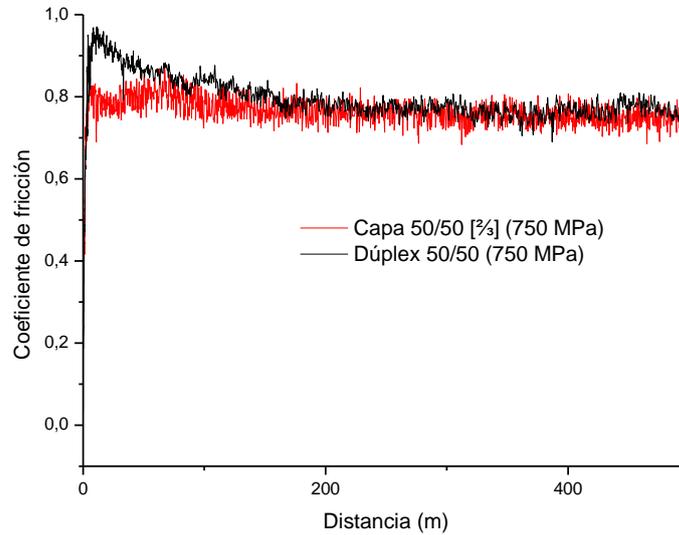
La capa de la mezcla da un coeficiente de fricción más inestable y ligeramente más elevado que la capa del atomizado por agua. Se obtienen valores intermedios entre los registrados en las bicapas de los aceros austeníticos y ferríticos.



La penetración al principio es más baja en la capa obtenida a partir de polvos ferrítico-austenítico atomizados por agua, pero a medida que avanza el ensayo va creciendo, con lo que al final la capa de la mezcla con polvo atomizado por gas tiene una penetración de aproximadamente 0.15 milímetros y la de la capa del atomizado por agua de unos 0.25 milímetros. El orden de magnitud coincide con los obtenidos en las bicapas austeníticas y ferríticas.

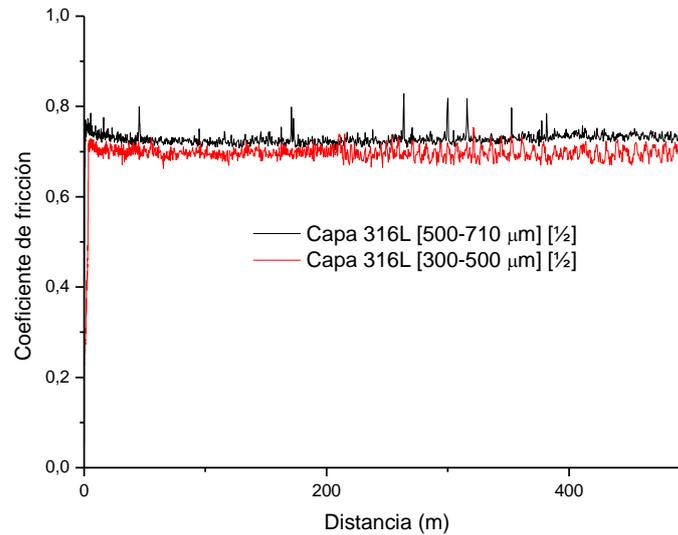


Comparando la capa del atomizado por agua con la muestra de acero dúplex para la misma presión de compactación se observa que el coeficiente de fricción es prácticamente idéntico, y que la penetración es claramente menor que en el acero dúplex, luego también en este caso la formación de bicapas da lugar a una mejora en el comportamiento frente al desgaste.

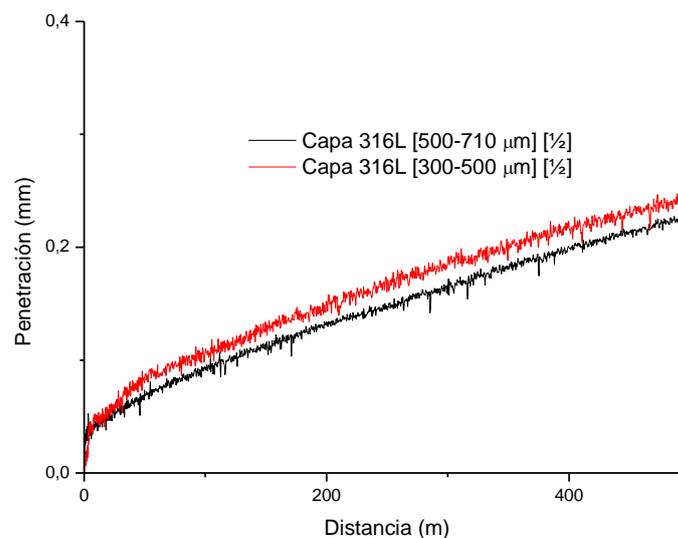


Bicapa Austenítica [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (550 Mpa)

El coeficiente de fricción es prácticamente idéntico en ambas capas, aunque ligeramente más alto en la de polvo más grueso. Una vez más, el valor medio se sitúa en torno a 0.7 que es lo que se ha observado en el acero austenítico obtenido a partir de polvo convencional.

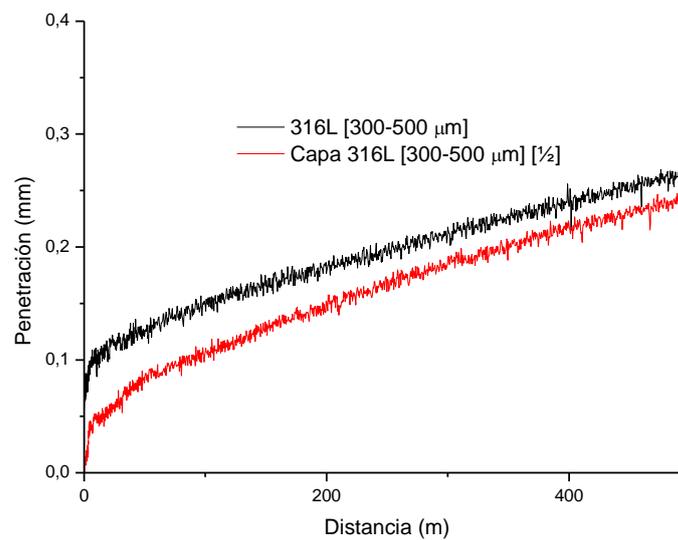
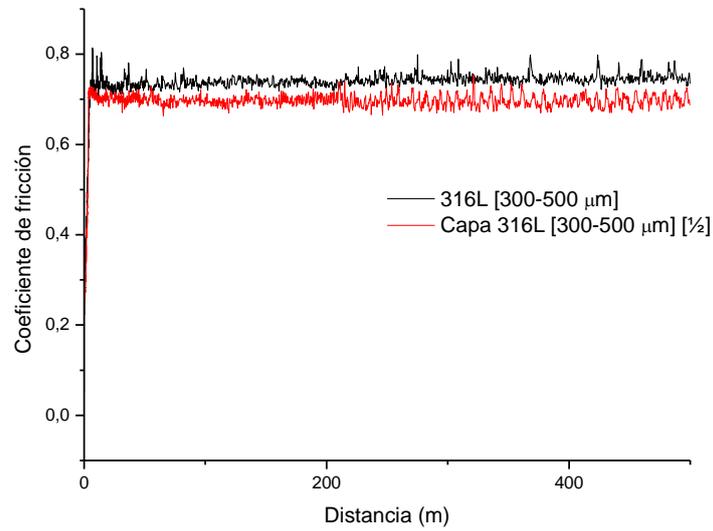


En cuanto a la penetración, se observa que en ambas capas es similar, ligeramente más alta la de tamaño de grano intermedio. En la figura se aprecia claramente la similar evolución de la penetración a lo largo del ensayo.

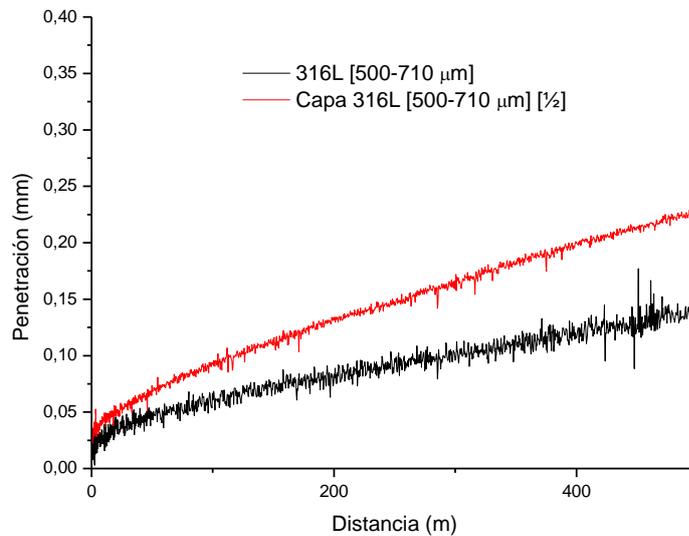
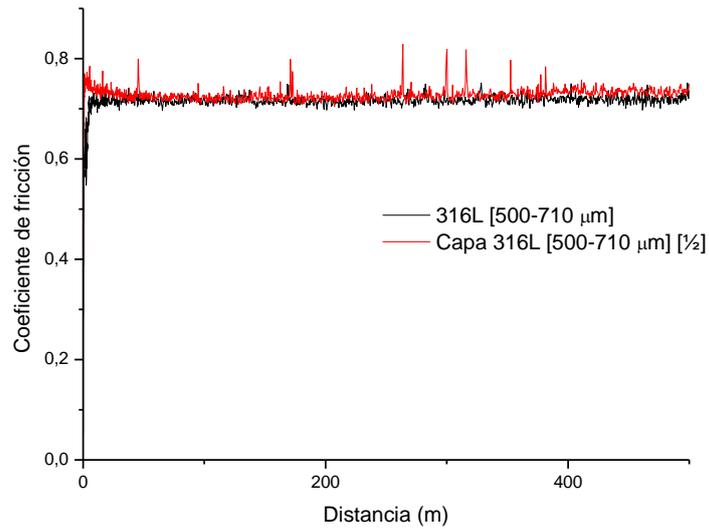


Para concluir con este análisis se compara el comportamiento de cada capa con el acero base correspondiente, y se obtiene lo siguiente:

Para la capa del grano intermedio el coeficiente es ligeramente inferior en la bicapa y la penetración ligeramente más baja.



Para la capa de grano grueso el coeficiente de fricción es idéntico y la penetración ligeramente inferior.



Luego también en el caso de las bicapas austeníticas generadas a partir de mezclas con diferentes tamaños de partícula se observa una mejora con respecto a los aceros base de referencia como también ocurría en las bicapas obtenidas con mezclas de polvos atomizados por gas.

Finalmente añadir que en los anexos se encuentran las gráficas de cada muestra individualmente, con su coeficiente de fricción y la penetración correspondientes.

5.4.2 - ENSAYO DE DESGASTE CON LUBRICACIÓN DISCONTINUA

5.4.2.1 - Aceros base y Mezclas

Se han realizado ensayos con lubricación discontinua utilizando como lubricante Carboximetilcelulosa sobre las muestras de aceros de tamaño de grano estándar, y se han agrupado en un solo apartado los aceros base y las mezclas por su interés en compararlos.

Se observa una reducción drástica de los coeficientes de fricción en todos los casos con respecto al desgaste seco. En el coeficiente de fricción se observa cierta periodicidad que muy probablemente tiene que ver con la discontinuidad de la lubricación.

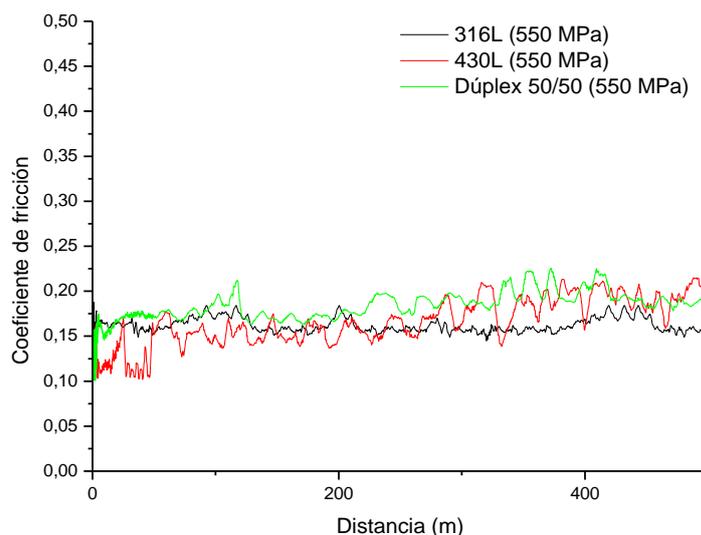
Efecto de la composición

Se van a comparar las tres muestras ensayadas a la misma presión de compactación y carga empleada en el ensayo.

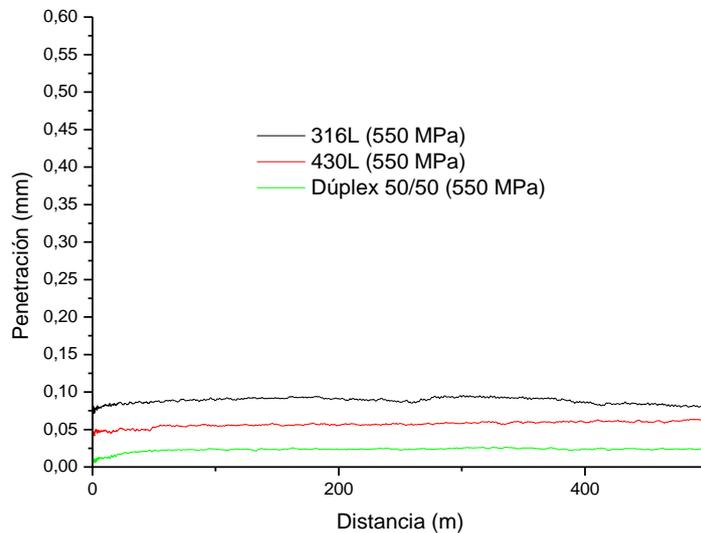
Muestras compactadas a 550 MPa y con 10 N de carga

Hay picos que parecen coincidir con los periodos de lubricación y parada. Esto es mucho más evidente para 430L y para el Dúplex 50/50. En el 316L las diferencias son menos apreciables el coeficiente muestra una variación más continua.

Las diferencias entre las composiciones son mínimas en cuanto al coeficiente de fricción. A medida que progresa el ensayo el coeficiente de fricción del acero 316L es ligeramente más bajo y el del Dúplex 50/50 ligeramente más alto. En el caso del desgaste seco el acero austenítico mostraba coeficientes de fricción un 30% más reducidos que el acero ferrítico.



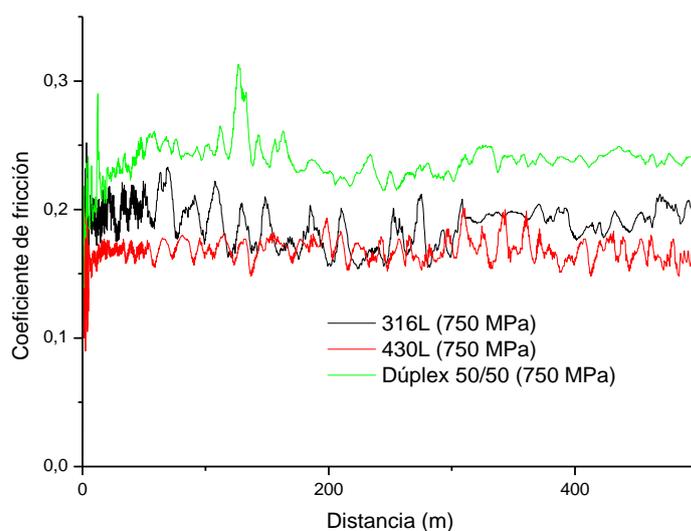
La penetración es máxima para el acero 316L, como ya ocurría en el caso del desgaste seco y mínima para el Dúplex 50/50, como también se observaba en desgaste seco. Si bien en este caso las diferencias son mucho menores y en todos los casos la penetración es muy baja.



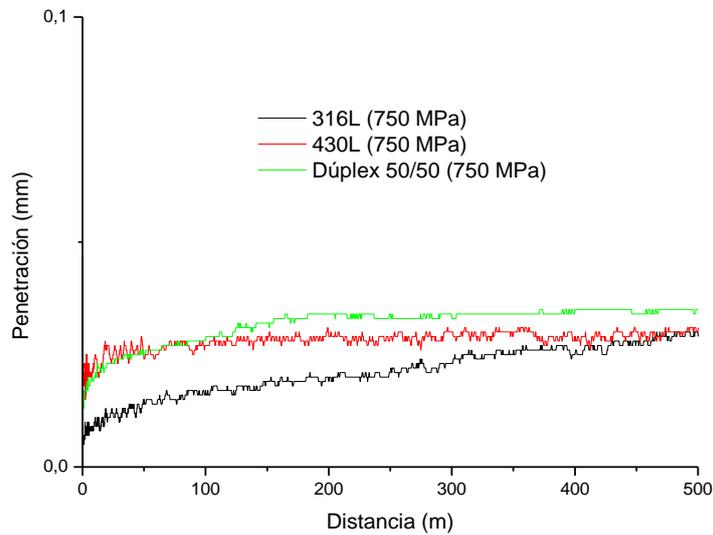
Muestras compactadas a 750 MPa y con 10 N de carga

Se siguen observando las mismas oscilaciones en el coeficiente de fricción que deben corresponder a los periodos de lubricación y secado, en este caso también para el acero 316L la anchura de los picos es mayor y la amplitud menor, sobre todo para tiempos mayores.

Las diferencias de coeficientes de fricción para 430L y 316L son mínimas y el coeficiente de fricción es ligeramente más alto para el Dúplex 50/50.



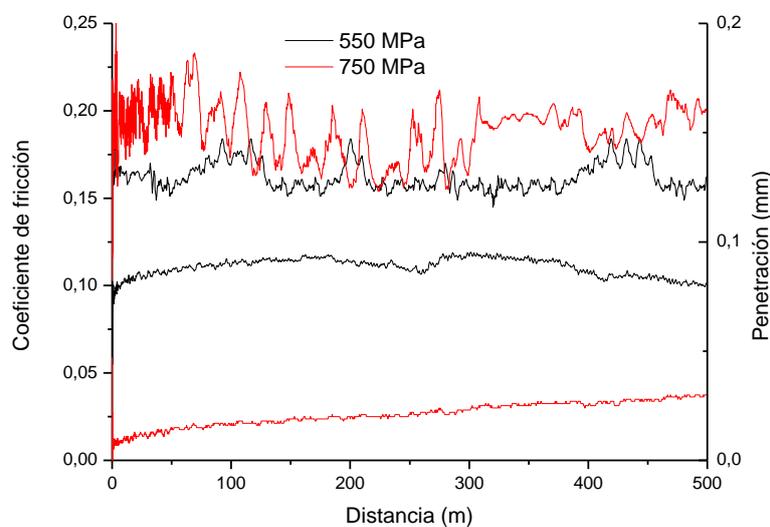
Las diferencias de penetración son escasas: ligeramente más baja para el acero 316L y ligeramente más alta para el Dúplex 50/50, aunque en todos los casos se puede suponer una elevada resistencia al desgaste.



Efecto del compactado

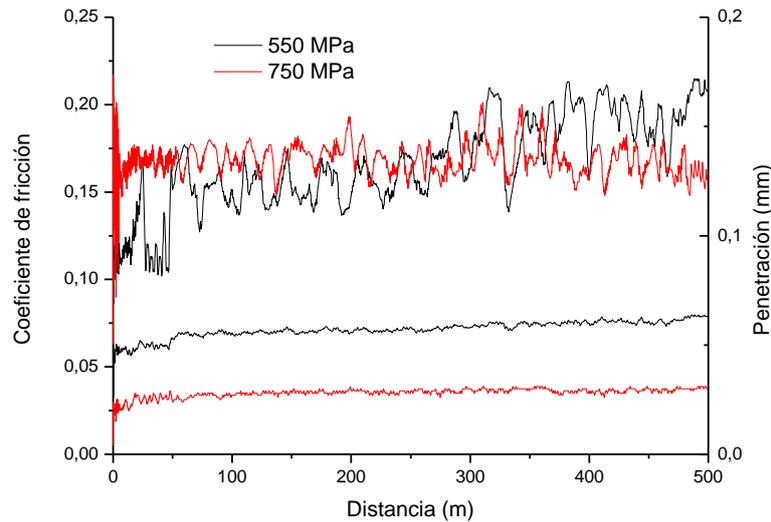
316L

Para el acero base 316L se observa que en el coeficiente de fricción apenas hay diferencias entre las dos presiones de compactación utilizadas, si bien es ligeramente más alto para 750 MPa, pero en cambio sí se observan diferencias en cuanto a la penetración, pues es claramente menor para la compactada a 750 MPa. También en los ensayos de desgaste seco las muestras compactadas a mayor presión presentaban mejor comportamiento frente al desgaste.

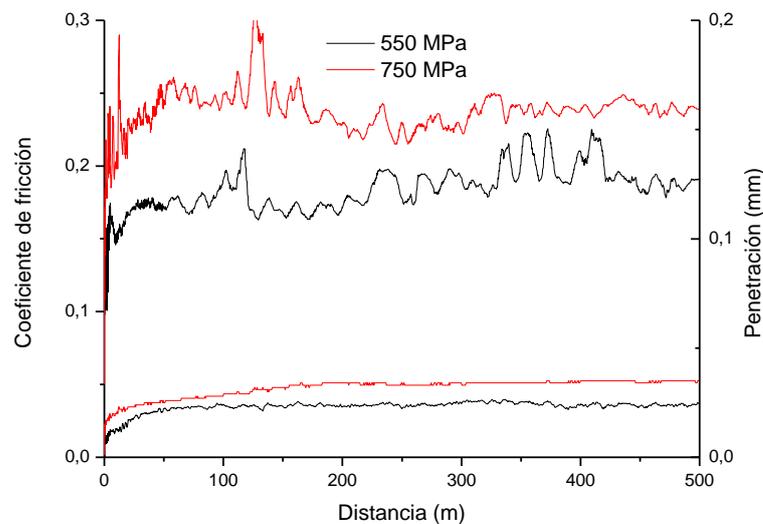


430L

En las muestras ensayadas de acero 430L se observa que el coeficiente de fricción es similar para ambas presiones de compactación, pero la penetración es inferior en la muestra compactada a 750 MPa, como sucedía en el acero 316L, coincidiendo una vez más con los ensayos realizados sin lubricación.

*Dúplex 50/50*

En el ensayo realizado sobre la muestra Dúplex 50/50 se observa que el coeficiente de fricción para la muestra compactada a 750 MPa es ligeramente más alto que el de la muestra compactada a 550 MPa. No hay apenas diferencia en la penetración, que es en los dos casos muy reducida.



5.4.2.3 - Bicapas

En el caso de las bicapas se ha realizado el ensayo de desgaste con lubricación discontinua exclusivamente en la capa de la mezcla con polvo atomizado por gas en las distintas bicapas con tamaño de grano estándar, y se las ha comparado con las muestras puras.

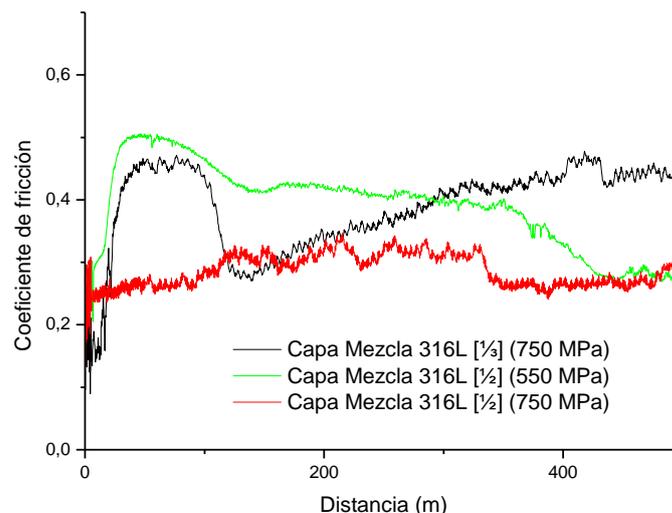
Bicapas 316L

En el caso de las bicapas austeníticas con tamaño de grano estándar se han realizado ensayos sobre las tres disponibles:

- Bicapa 316L [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (750 MPa)
- Bicapa 316L [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (550 MPa)
- Bicapa 316L [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa)

Coefficiente de fricción:

Hay muchas más variaciones debidas al efecto de la lubricación que, como ya se ha comentado, es de tipo discontinuo:



Los coeficientes de fricción bajan muchísimo con respecto al ensayo de desgaste seco, con lo que cabe concluir que en este caso también el efecto del lubricante es notable.

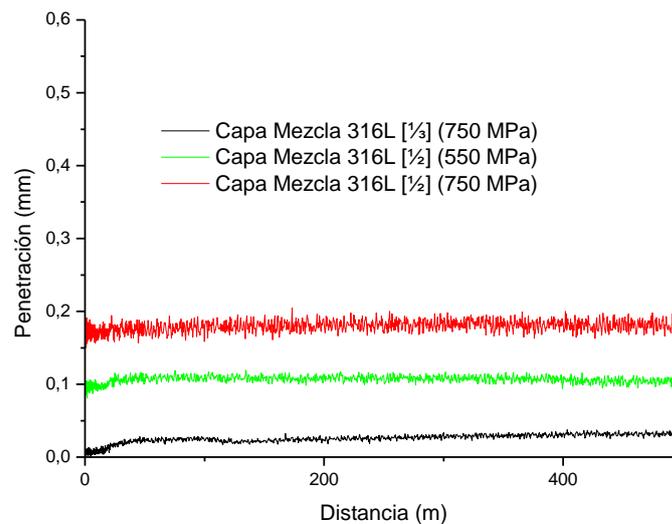
No hay grandes diferencias ni entre las bicapas ni con la presión de compactación. En el caso de la capa Mezcla 316L [$\frac{1}{3}$] (750 MPa) la evolución del coeficiente de fricción no es continua, sino que el coeficiente se incrementa mucho al principio, cae después considerablemente y vuelve a subir. Esta evolución discontinua también se observa en la capa Mezcla 316L [$\frac{1}{2}$] (550 MPa), aunque no de modo tan brusco.

Con respecto al efecto de la presión de compactación se observa que para la presión de 550 MPa el coeficiente de fricción es ligeramente mayor.

Penetración:

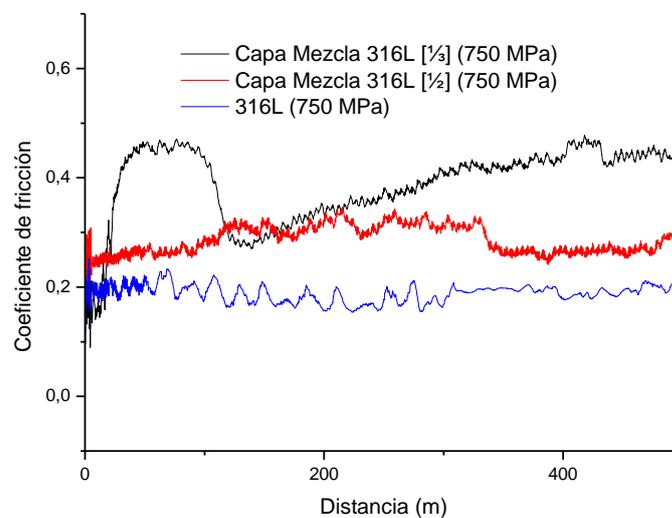
En el caso de la penetración, como viene siendo habitual sí que se observa que hay claras diferencias: la capa Mezcla 316L [$\frac{1}{3}$] es la que presenta penetraciones menores, mientras que la capa Mezcla 316L [$\frac{1}{2}$] (750 MPa) con mayor cantidad de polvo atomizado por gas es la que presenta la máxima penetración.

Con respecto al efecto de la presión de compactación, se observa un mejor comportamiento para la muestra compactada a 550 MPa, aunque las diferencias son escasas.

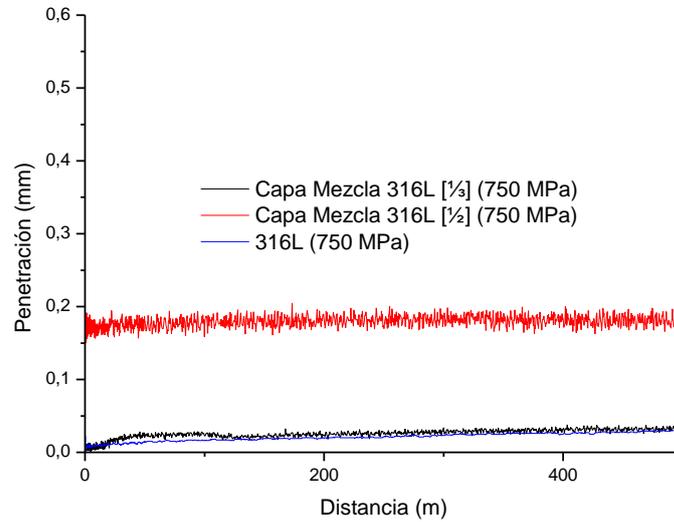


Comparación con el acero base:

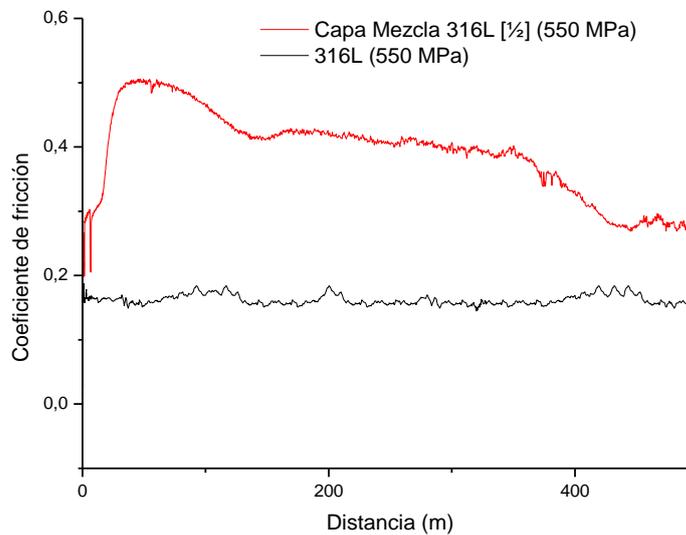
Comparando las capas ensayadas con los aceros base se observa que hay cambios sustanciales con respecto al austenítico puro, y que éste muestra en todos los casos un coeficiente de fricción menor.

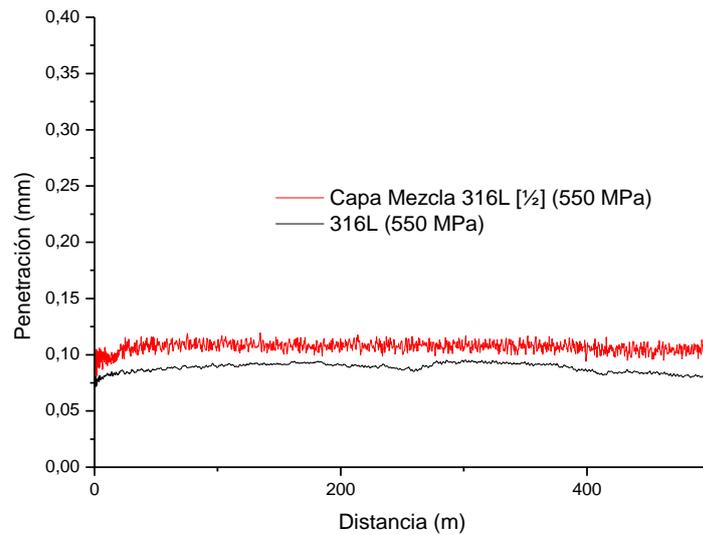


En cuanto a la penetración, a pesar de ser bastante reducida en todos los casos, se observa que en la capa Mezcla 316L [1/3] la penetración es idéntica a la del acero base, mientras que en la capa Mezcla 316L [1/2] la penetración es mayor.



En cuanto a la capa de la muestra compactada a 550 MPa, al compararla con el acero base se observan cambios en el coeficiente de fricción, pero la penetración es idéntica:



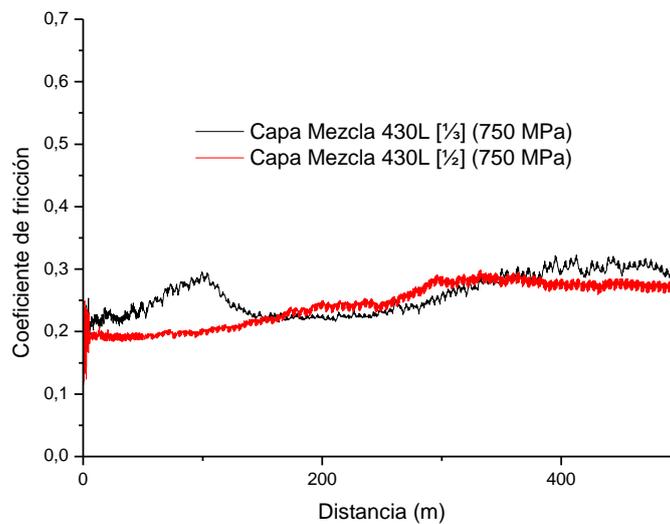


Bicapas 430L

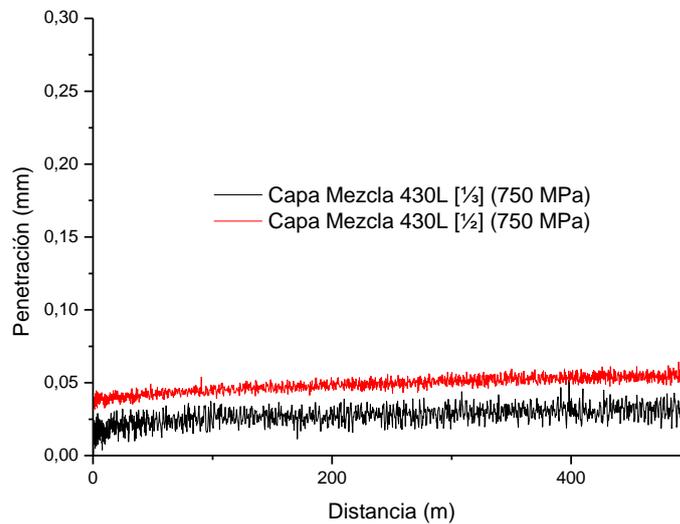
En el caso de las bicapas ferríticas se han realizado ensayos sobre las dos disponibles:

- Bicapa 430L [1/2-1/2] (750 MPa)
- Bicapa 430L [2/3-1/3] (750 MPa)

Los valores del coeficiente de fricción prácticamente se superponen en las dos bicapas. Se obtienen datos mucho más bajos que en ensayo de desgaste seco, con valores entre 0.15 y 0.30. En este caso las oscilaciones son también mucho mayores que en el ensayo en seco, como ya se observó en las bicapas austeníticas.

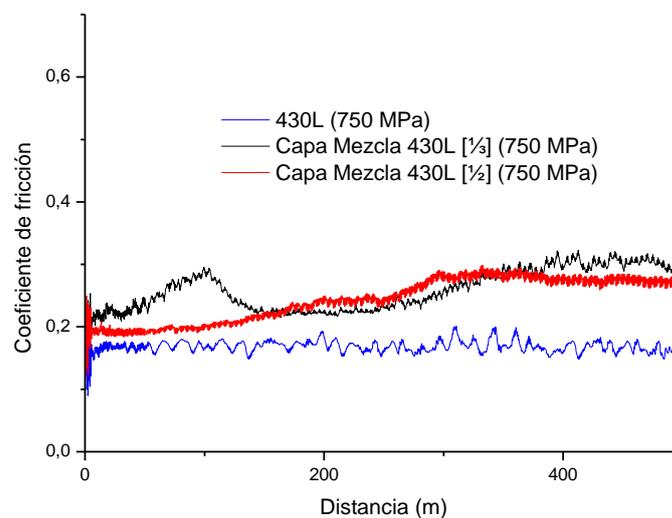


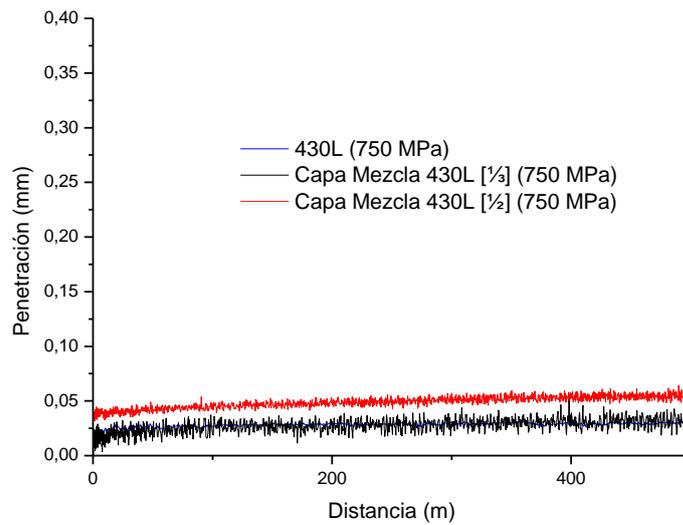
En cuanto a la penetración, se observa una ligera diferencia, algo menor en la capa Mezcla 430L [$\frac{1}{3}$], aunque en los dos casos la penetración es mínima y podemos concluir que en todas las bicapas ferríticas se consigue con la lubricación mejorar la resistencia a la fricción y al desgaste



Comparación con el acero base:

Comparando las capas ensayadas con el acero base se observa que el coeficiente de fricción aumenta en ambos casos en la capa de la mezcla, mientras que en la penetración apenas hay diferencias.

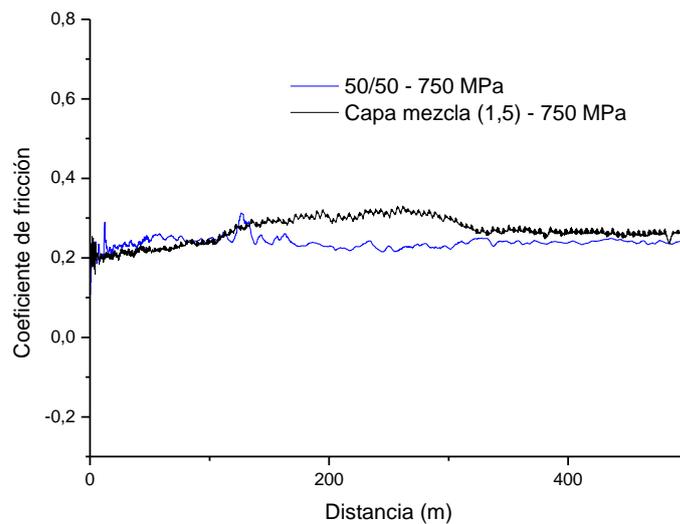


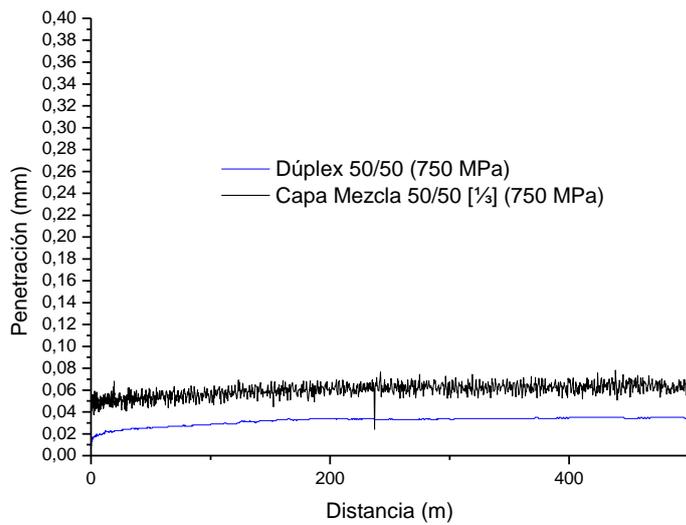


Bicapa 50/50 [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa)

A la bicapa ensayada se la ha comparado con la muestra del Dúplex 50/50 compactada a 750 MPa.

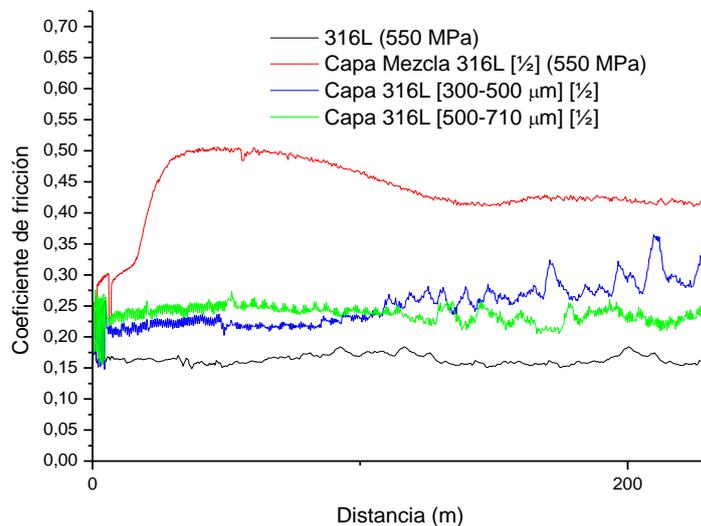
El coeficiente de fricción no se modifica sustancialmente con respecto al Dúplex 50/50, y la penetración es muy similar. Los valores obtenidos son más bajos que los registrados en las bicapas ferríticas y austeníticas. Las penetraciones son también muy bajas, con lo que cabe concluir que también en el caso de desgaste con lubricación el acero dúplex y la bicapa correspondiente muestra mejor comportamiento en servicio que los utilizados para su elaboración.





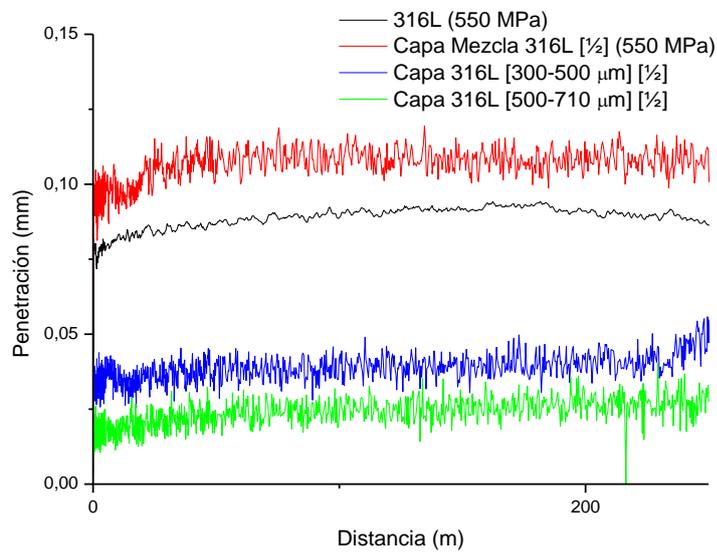
Bicapa Austenítica [1/2-1/2] (550 Mpa)

Se ha realizado el ensayo de desgaste con lubricación discontinua en las dos capas y se ha realizado una comparación entre las mismas y la capa de la mezcla de tamaños de partícula 316L [1/2] compactada a 550 MPa y la muestra de acero base 316L compactada a 550 MPa.



El coeficiente de fricción es muy similar para las dos capas de la bicapa y presenta un comportamiento muy similar y constante durante el resto del ensayo, siendo en ambos casos mayor que el de la muestra de acero base con tamaño de grano estándar y considerablemente menor que el de la capa de la mezcla.

En cuanto a la penetración, se observa que en ambos casos es menor a las muestras de acero base y de mezcla, lo que indica una mejora en el comportamiento frente al desgaste. Comparando las dos capas de la bicapa se observa mejor comportamiento en la muestra de tamaño de partícula más grueso.





5.4.3 - ENSAYO DE DESGASTE CON LUBRICACIÓN INTERNA

Se va a realizar el ensayo de desgaste con lubricación interna utilizando como lubricante una disolución de carboximetilcelulosa. Primeramente se va a ensayar con una disolución al 2%. A continuación, con el fin de analizar los posibles efectos de la disminución de la concentración en la disolución, se van a realizar ensayos con carboximetilcelulosa al 1% y al 0.5%.

5.4.3.1 - Carboximetilcelulosa al 2% - Media hora de vacío

5.4.3.1.1 - Aceros base y Mezclas

En este apartado se han agrupado los ensayos realizados sobre los aceros base y las mezclas conjuntamente, ya que es interesante la comparación entre los mismos, puesto que están muy relacionados los aceros base austeníticos con diferente tamaño de grano con la Mezcla Austenítica y los aceros base austenítico y ferrítico con el Dúplex 50/50.

Aceros base con tamaño de grano estándar:

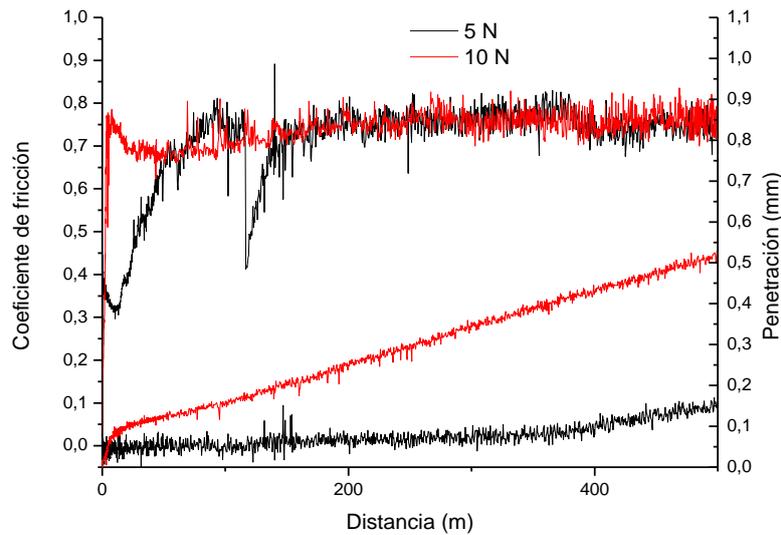
En primer lugar se ha realizado un amplio estudio de las muestras de acero base austenítico y ferrítico, y se le ha comparado con la mezcla Dúplex 50/50, puesto que la misma está compuesta por un 50% de polvo de acero ferrítico atomizado por agua y un 50% de polvo de acero austenítico atomizado por agua. Se ha estudiado el efecto de la carga, el efecto de la composición y el efecto del compactado. Todos ellos se han fabricado a partir de polvos de acero atomizados por agua convencionales esto es de tamaño de partícula menor de 150 micras.

Efecto de la carga

Se ha realizado el ensayo de desgaste con lubricación interna con dos cargas diferentes: 5 N y 10 N, y se obtienen los siguientes resultados:

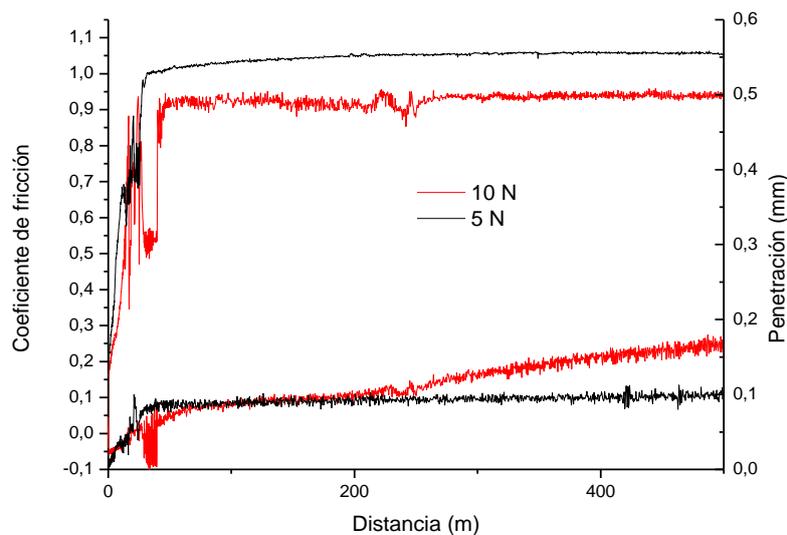
Muestras compactadas a 550 MPa

Para el acero 316L no se observan grandes diferencias en cuanto al coeficiente de fricción entre las dos cargas. Durante el primer tercio del ensayo se observan variaciones, pero a medida que avanza el ensayo el coeficiente termina siendo idéntico para las dos cargas. Donde sí se observan diferencias importantes es en la penetración, ya que a mayor carga la penetración se triplica.



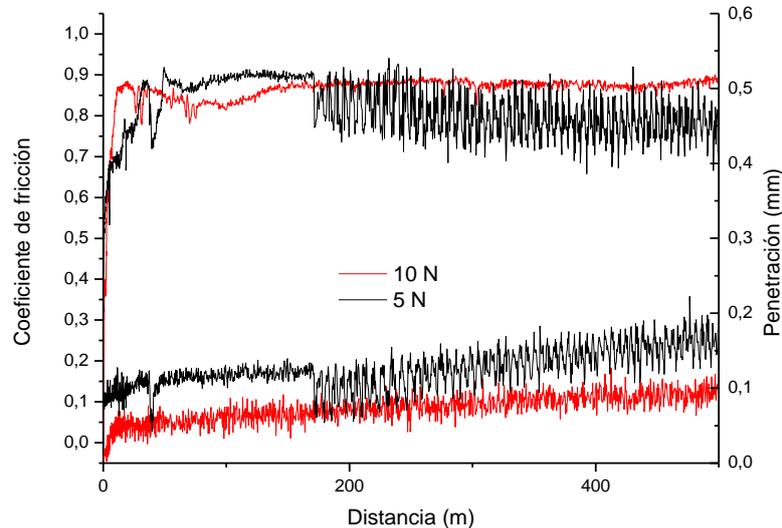
Para el acero 430L se observa que el coeficiente de fricción es prácticamente constante en todo el ensayo, excepto en los primeros metros, y hay una diferencia importante: en ambos casos es muy alto, con datos similares a los obtenidos en el desgaste seco, pero mientras que en el ensayo realizado con 10 N está en torno a 0.9, en el ensayo realizado con 5 N roza la unidad.

En cuanto a la penetración, durante la mitad del ensayo es idéntica, pero aproximadamente a los 250 metros el ensayo realizado con mayor peso comienza a presentar una penetración mayor, aunque sigue siendo pequeña; mucho menor que en el caso de los aceros austeníticos. La penetración y el coeficiente de fricción es del mismo orden de magnitud que los obtenidos en el desgaste seco.



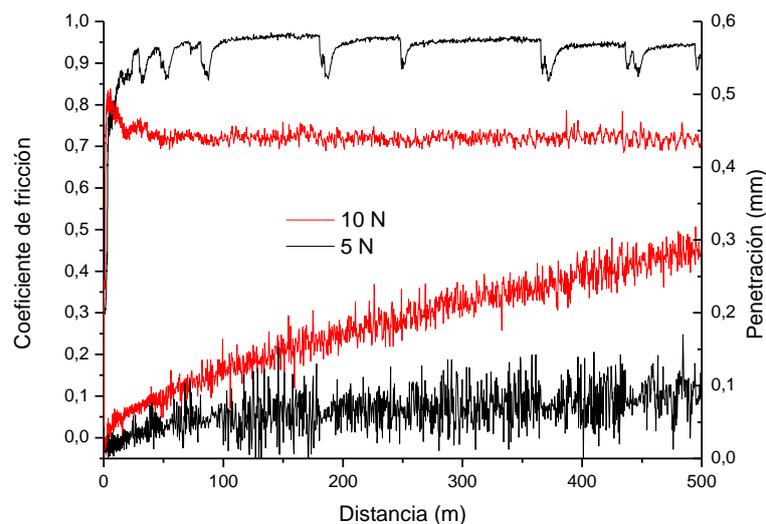
Para el Dúplex 50/50 el coeficiente de fricción es similar, se mueve en el rango de 0.8 y 0.85, siendo algo mayor el de la muestra ensayada con 10 N, que una vez más es intermedio

entre el del acero austenítico y ferrítico. En cuanto a la penetración, en este caso es similar, con 0.1 para el ensayo con 10 N y 0.2 con el ensayo con 5 N. En ambos casos se observa un mejor comportamiento frente al desgaste que los aceros base de referencia, pero con datos similares a los obtenidos en el desgaste seco.

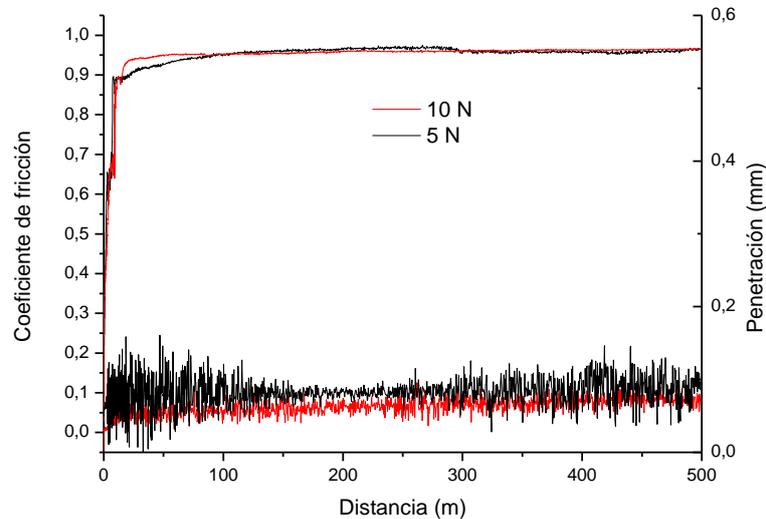


Muestras compactadas a 750 MPa

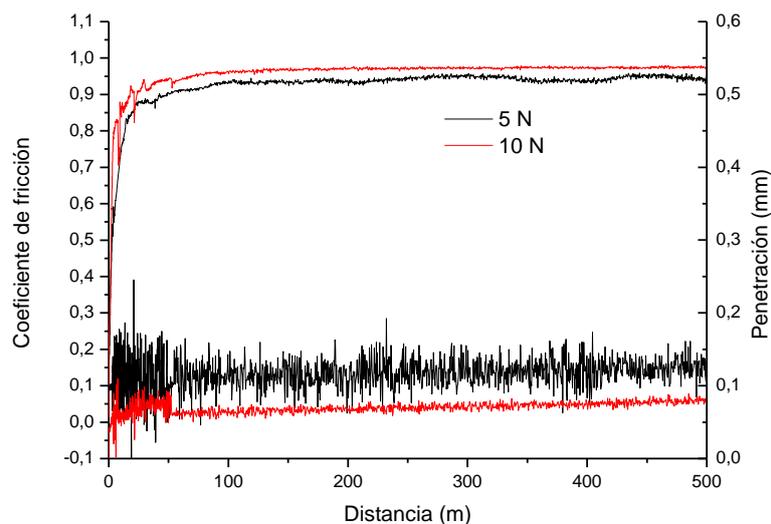
Para el acero 316L se observan unas importantes diferencias tanto en el coeficiente de fricción como en la penetración: con 10 N el coeficiente de fricción es menor, en torno a 0.7, y la penetración triplica a la del ensayo con 5 N, cuyo coeficiente de fricción es mayor, en torno a 0.95. También se observa en este caso mayores variaciones a lo largo del ensayo.



Para el acero 430L apenas se notan cambios en ambos ensayos: tanto el coeficiente de fricción como la penetración es prácticamente idéntica y menor que en el acero austenítico, como ya ocurría a la presión de compactación de 550MPa.



Para el Dúplex 50/50 se observan diferencias, pero no muy sustanciales: el coeficiente de fricción es prácticamente idéntico, mientras que la penetración es similar, algo superior a la del ensayo realizado con 5 N, pero con una diferencia entre ambos de apenas 0,05 milímetros. Al igual que para la menor presión de compactación los datos de penetración son menores que para los aceros base utilizados en la fabricación de la mezcla.

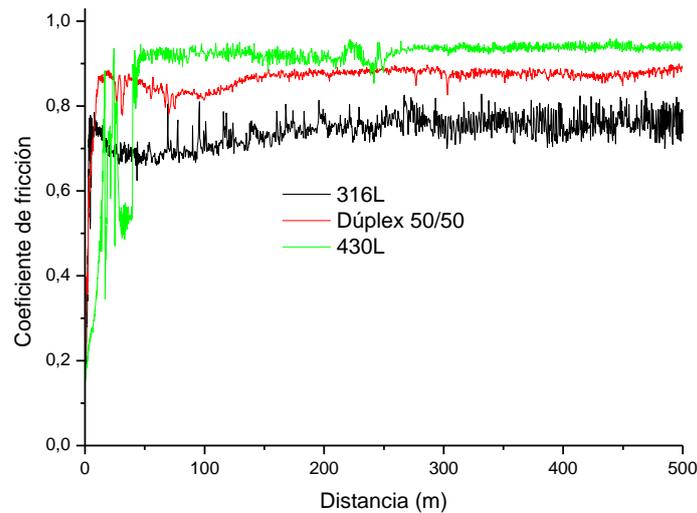


Efecto de la composición

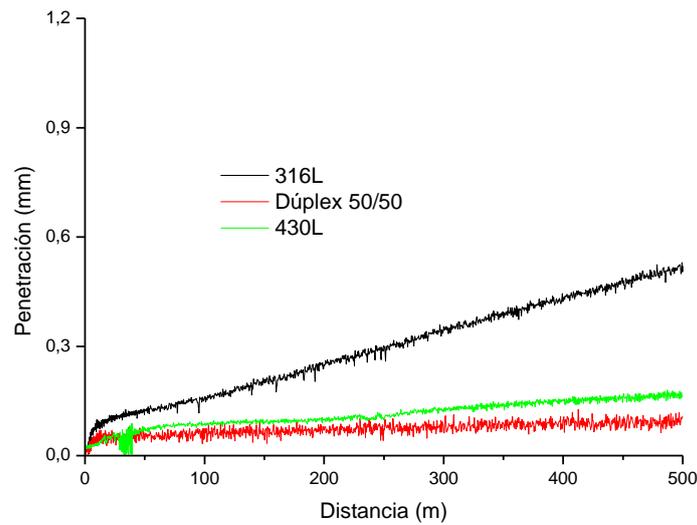
Con objeto de analizar de forma más clara el efecto de la composición, a continuación se van a comparar las tres muestras ensayadas a la misma presión de compactación y carga empleada en el ensayo.

Muestras compactadas a 550 MPa y con 10 N de carga

Claramente el que presenta un coeficiente de fricción menor es el acero 316L, mientras que el del Dúplex 50/50 y el acero 430L es mayor, siendo este último el más alto.

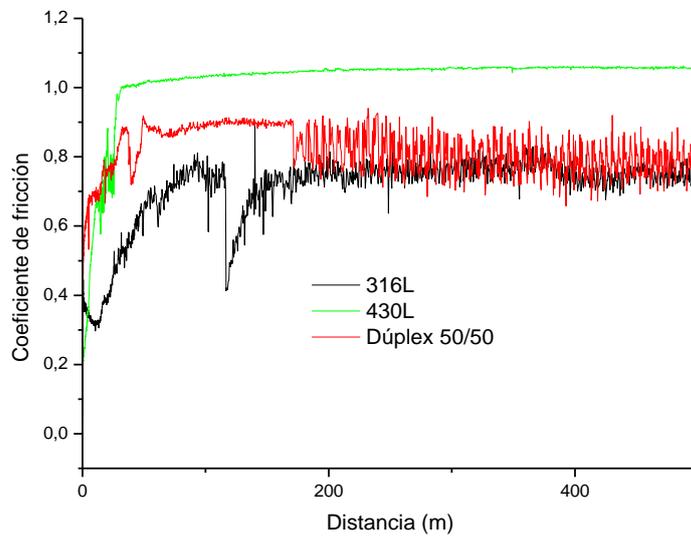


En cuanto a la penetración, se observa una diferencia también notable, destacando el acero 316L al igual que con el coeficiente de fricción con una penetración mayor, mientras que las otras dos muestras tienen una penetración muy baja y muy similar. Por tanto en cuanto a la resistencia al desgaste se observa que el acero dúplex tiene mejor comportamiento, como ya ocurría en el caso del ensayo de desgaste seco.

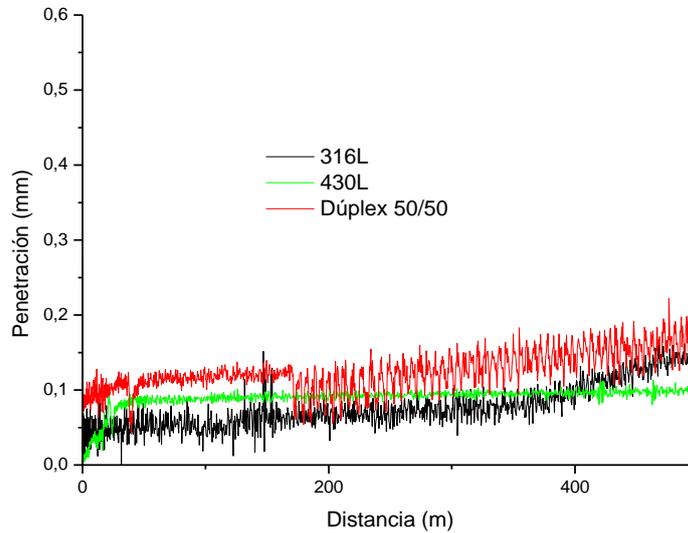


Muestras compactadas a 550 MPa y con 5 N de carga

En este caso se observa que el coeficiente de fricción del Dúplex 50/50 y del acero 316L es muy similar, si bien en el primer tercio del ensayo había una diferencia, a medida que avanza el mismo se estabilizan ambos. En el caso del coeficiente de fricción del acero 430L, roza la unidad.

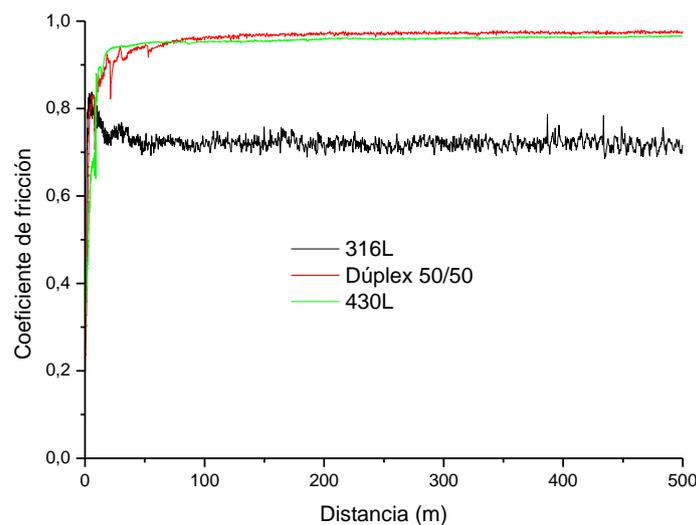


En cambio, en cuanto a la penetración no hay diferencias significativas, siendo ésta muy pequeña, en todos los casos en torno a 0.1 milímetros. La más constante parece la del acero 430L, y ésta es algo menor que la de las otras dos muestras.

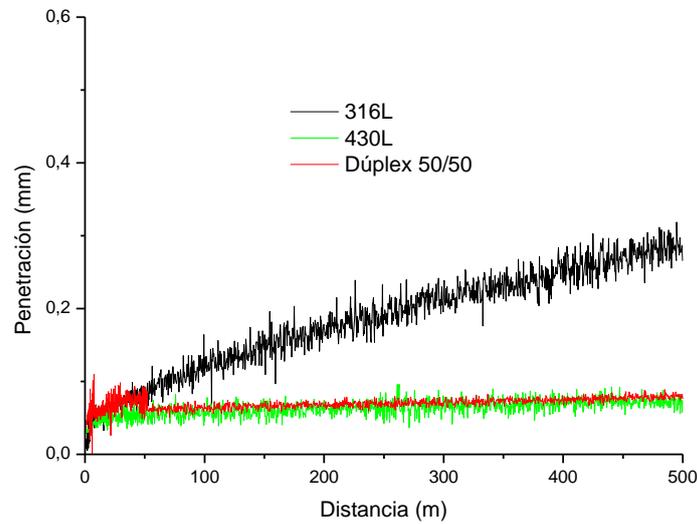


Muestras compactadas a 750 MPa y con 10 N de carga

Como ya ocurría con la muestra compactada a 550 MPa y con la misma carga, hay una importante diferencia entre el coeficiente de fricción del acero 316L y el de las otras dos muestras, siendo éste menor (en torno a 0.70) y los otros prácticamente idénticos (en torno a 0.9).

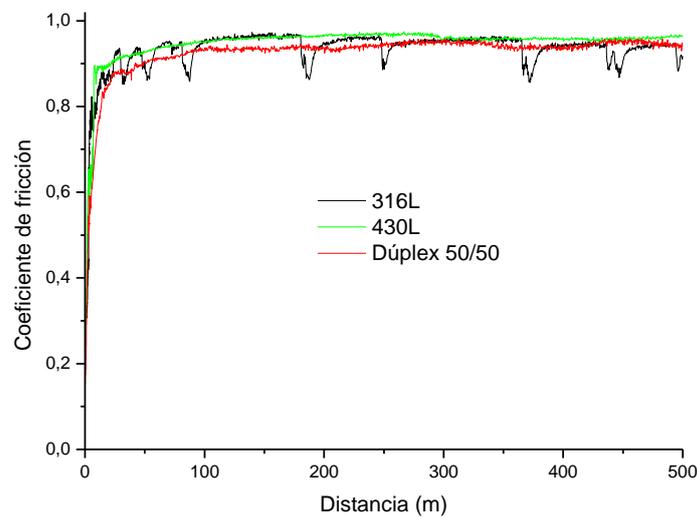


Lo mismo ocurre con la penetración, la cual es notablemente más elevada en la muestra del acero 316L, mientras que en las otras dos muestras se mantiene prácticamente constante y por debajo de 0.1 milímetros.

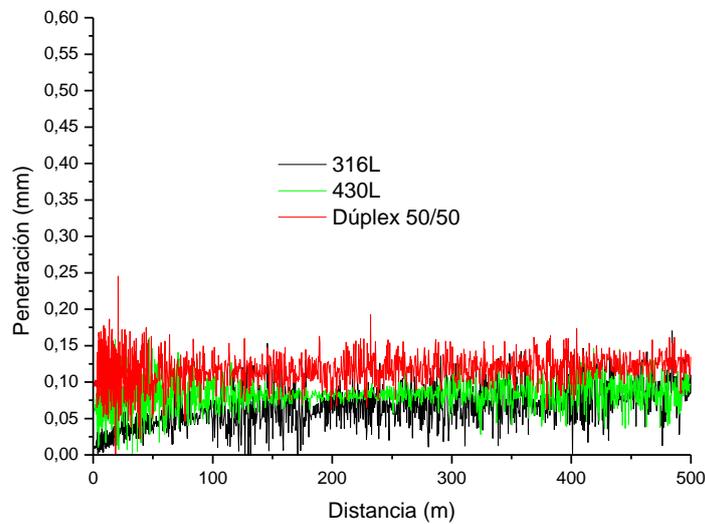


Muestras compactadas a 750 MPa y con 5 N de carga

Apenas se notan diferencias en el coeficiente de fricción, puesto que en las tres muestras está en torno a 0.95.



Lo mismo ocurre con la penetración, donde no se encuentran diferencias destacables entre las muestras, ya que en todos los casos las penetraciones son muy bajas.

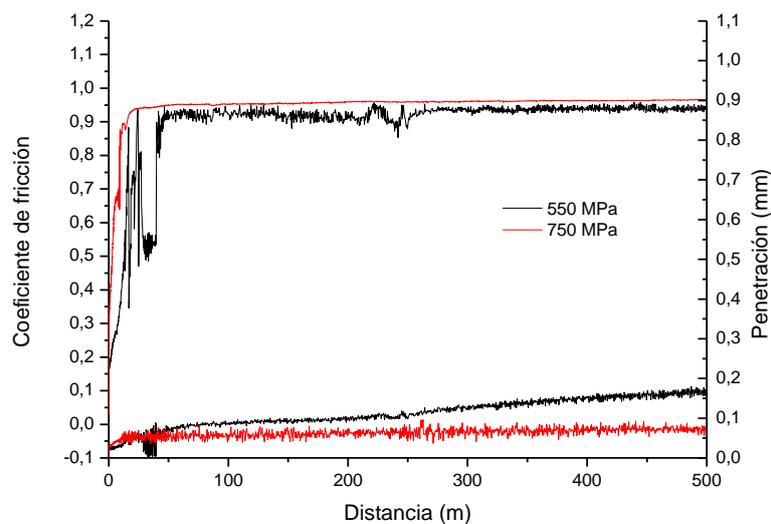


Efecto del compactado

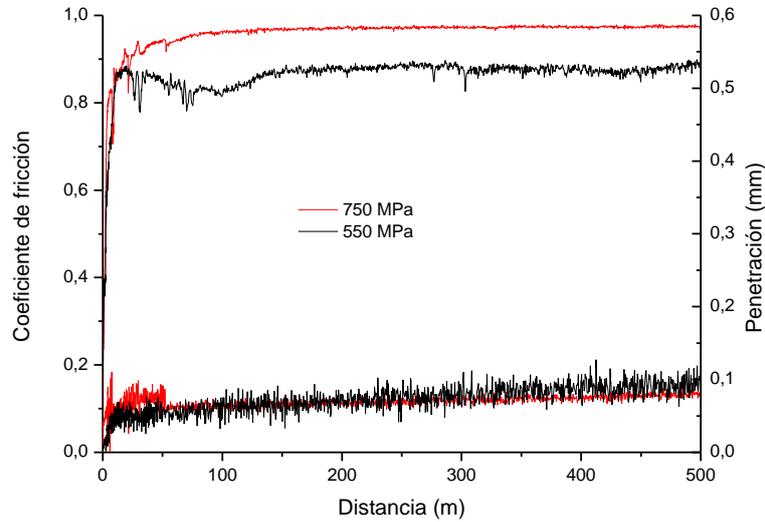
Se van a comparar cada muestra según la presión de compactación, con el ensayo realizado con la misma carga.

Ensayos realizados con 10 N

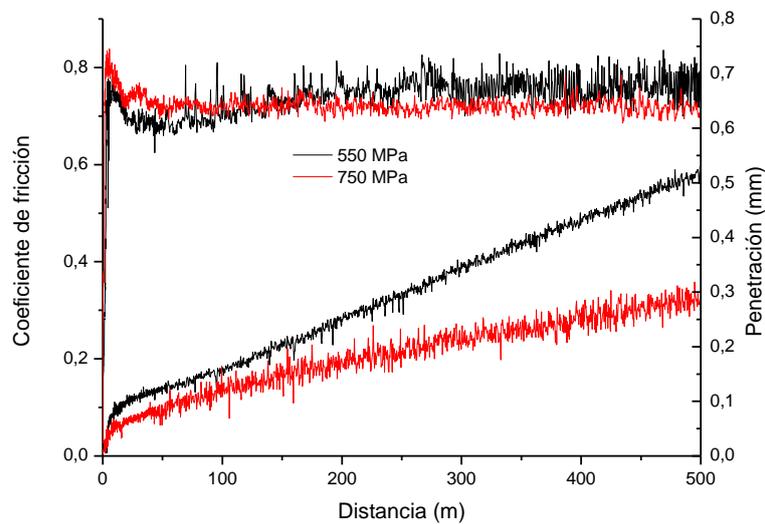
En cuanto al acero 430L, no hay diferencias sustanciales entre una presión de compactación y otra: el coeficiente de fricción es muy similar, y la penetración es baja en ambos casos, aunque mayor en la muestra compactada a 550 MPa, más porosa.



En el Dúplex 50/50 se observa que el coeficiente de fricción es mayor en la muestra compactada a 750 MPa, pero en la penetración apenas hay variaciones; de hecho prácticamente se superponen en la gráfica, son idénticas.



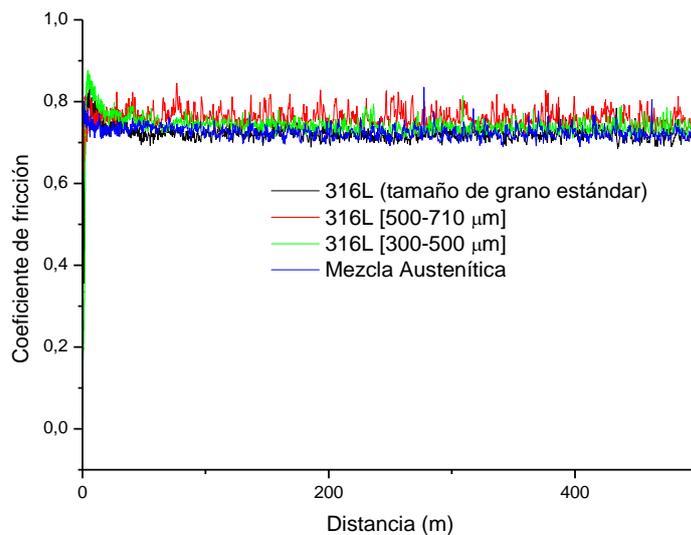
En el acero 316L vamos a encontrar diferencias importantes en la penetración, que es grande en ambos casos en comparación con el acero base ferrítico y el dúplex, siendo la penetración notablemente mayor en la muestra compactada a 550 MPa. Sin embargo, apenas se ven diferencias en el coeficiente de fricción, que es prácticamente idéntico en todo el ensayo.



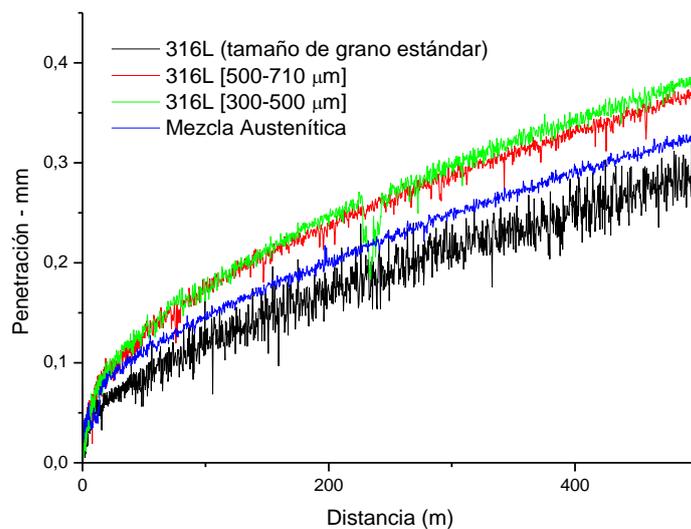
Muestras austeníticas:

Se va a analizar el efecto del tamaño de partícula de polvo de acero austenítico en el ensayo de lubricación interna, por lo que se usarán las muestras compactadas a diferentes presiones de acero base 316L con diferentes tamaños de grano (estándar, 300-500 μm , 500-710 μm) y la Mezcla Austenítica.

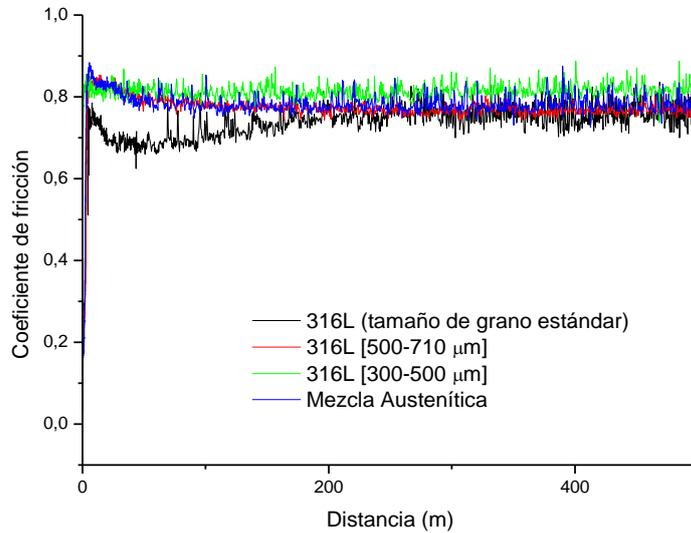
Evaluando el comportamiento a 750 MPa, se observa que el coeficiente de fricción apenas se modifica en todas las muestras, y estará en el mismo rango, entre 0.7 y 0.8.



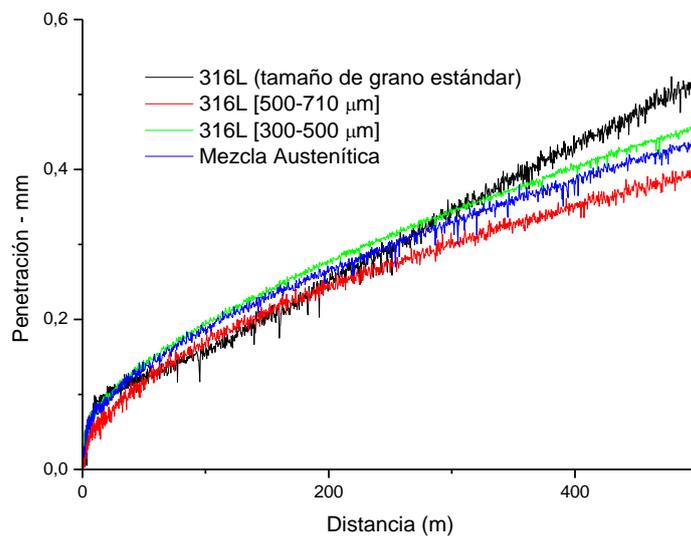
En la penetración sí que hay diferencias, aunque la dinámica es similar. Las muestras más porosas presentan mayor penetración, mientras que en el acero de tamaño de grano estándar y la mezcla austenítica la penetración es menor.



En cuanto al comportamiento de las muestras compactadas a 550 MPa, se observa que los coeficientes de fricción suben ligeramente con respecto al caso anterior, pero todos se mueven en el mismo rango.



En cuanto a la penetración, la dinámica es la misma, aunque se observa que los materiales más porosos son en los que menos penetración hay, pero las diferencias son muy bajas.



A la vista de los resultados obtenidos podemos concluir que la lubricación interna no está ejerciendo un efecto visible en el comportamiento frente al desgaste ni siquiera en los materiales más porosos obtenidos a partir de aceros de polvo de acero más grueso y compactados a menor presión de compactación, ya que el valor tanto de coeficiente de fricción como de penetración es similar en todos los casos.

5.4.3.1.2 - Bicapas

Bicapas 316L

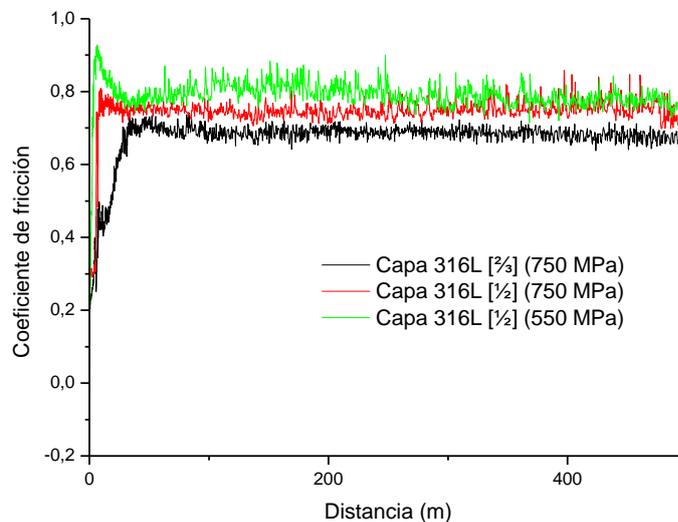
En el caso de las bicapas austeníticas se han realizado ensayos sobre las tres disponibles:

- Bicapa 316L [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (750 MPa)
- Bicapa 316L [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (550 MPa)
- Bicapa 316L [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa)

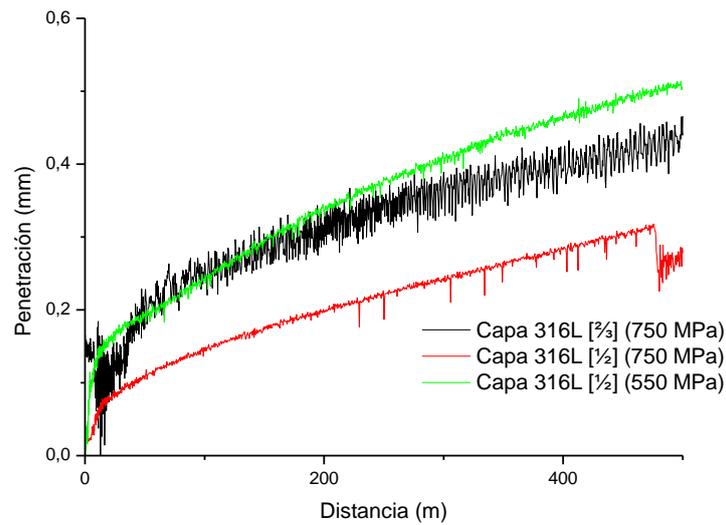
El análisis de los resultados obtenidos que se ha realizado ha sido por capas, evaluando el comportamiento primeramente de la capa de polvos atomizado por agua y a continuación la capa que posee mezcla con polvos atomizados por gas.

Capa 316L:

El coeficiente de fricción en las tres muestras es bastante estable. Las capas de las bicapas compactadas a 750 MPa están en torno a 0.75 (la bicapa con proporción [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$]) y 0.7 (la bicapa con proporción [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$]), mientras que la capa de la bicapa compactada a 550 MPa tiene un coeficiente de fricción algo superior, en torno a 0.8. Como puede observarse se encuentran en un rango parecido al de los aceros base.

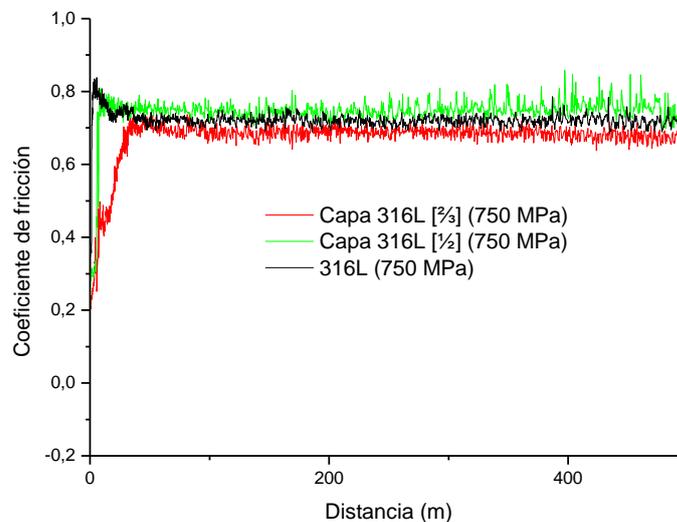


En cuanto a la penetración, en las muestras compactadas a 750 MPa se observa una importante diferencia entre la capa de la bicapa con proporción [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] y la capa de la bicapa con proporción [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$], siendo la penetración de esta última menor. En lo referente a la bicapa compactada a 550 MPa, se observa que la penetración es mayor que en las dos muestras anteriores, con lo que a pesar de su mayor porosidad el efecto de la lubricación interna no es apreciable. Se verifica que, como en el desgaste seco, la muestra con mayor proporción de polvo atomizado por gas es más resistente al desgaste.

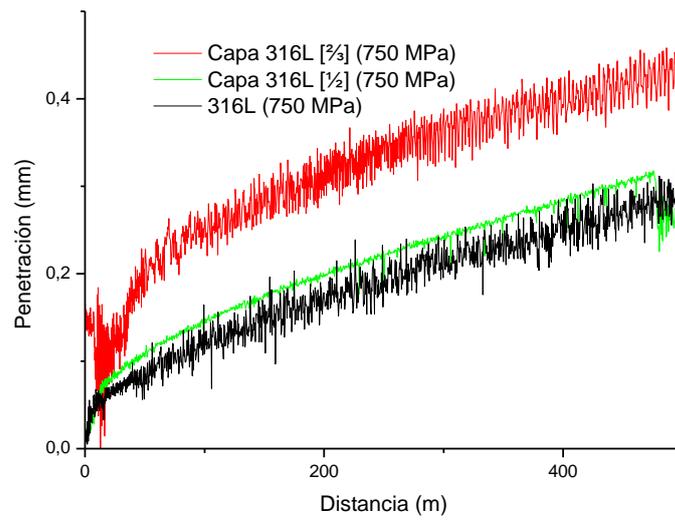


Esta capa también se va a comparar con las muestras de acero base según la presión de compactación:

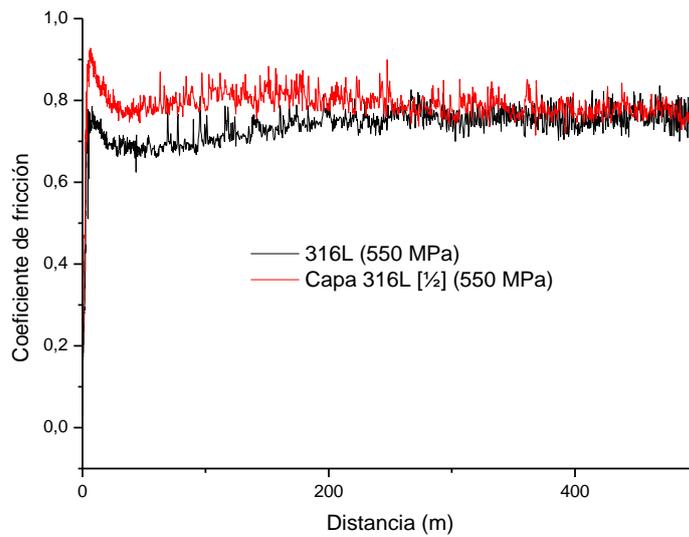
A 750 MPa el coeficiente de fricción de las capas y del puro es bastante semejante, siendo este último intermedio entre el de las otras dos muestras.



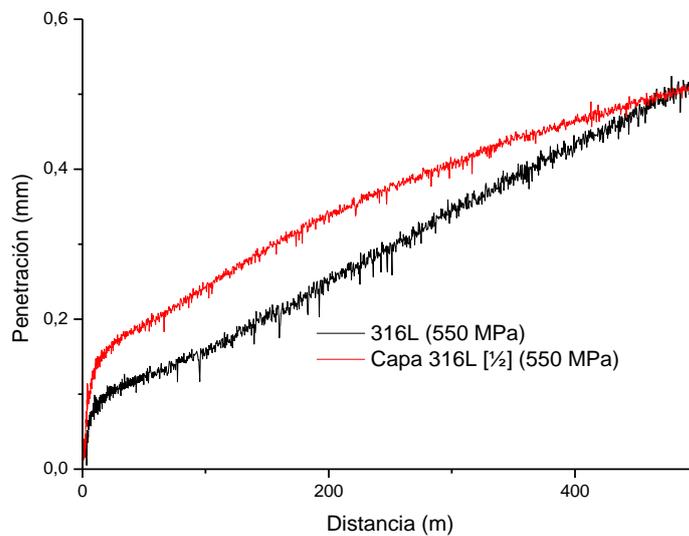
En lo referente a la penetración, el acero base es el que menor penetración tiene, aunque muy parecida a la de la capa de la bicapa con proporción [1/2-1/2], mientras que la capa de la bicapa con proporción [2/3-2/3] es la que presenta una penetración claramente mayor durante todo el ensayo. Por tanto se verifica un mejor comportamiento en la bicapa con mayor cantidad de polvo atomizado por gas. Al igual que en el caso anterior no existen diferencias sustanciales con el comportamiento frente al desgaste seco.



A 550 MPa el coeficiente de fricción es similar en la primera mitad del ensayo para terminar siendo prácticamente idéntico.



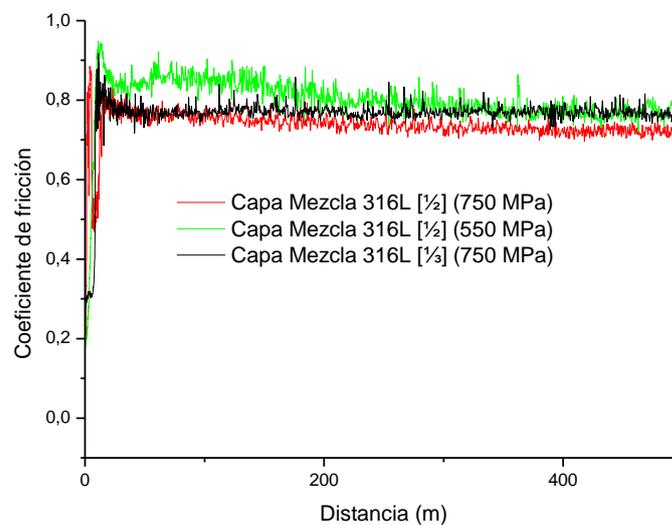
La penetración difiere ligeramente a lo largo del ensayo para terminar siendo idéntica al final del mismo



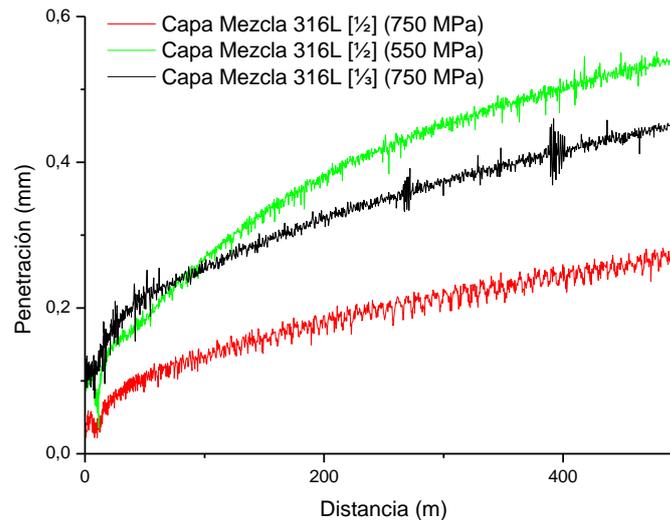
Los valores de penetración son similares o incluso mayores a los obtenidos en desgaste seco, con lo que podemos concluir que en las bicapas austeníticas la lubricación interna realizada al 2% mediante EPOVAC no ofrece una mejora sustancial en el comportamiento frente al desgaste.

Capa Mezcla 316L:

El coeficiente de fricción es parecido en todos los casos, algo más elevado en la bicapa compactada a 550 MPa y, comparando las muestras compactadas a 750 MPa, ligeramente más elevado en la capa de la bicapa con proporción [2/3-1/3].



Como ya es habitual la penetración sí que cambia con la presión de compactación: cuando ésta es de 550 MPa la penetración es mayor, mientras que cuando la muestra es compactada a 750 MPa la penetración es menor, notándose una diferencia destacable entre la capa de la bicapa con proporción $[\frac{2}{3}-\frac{1}{3}]$ (cuya penetración es mayor) y la capa de la bicapa con proporción $[\frac{1}{2}-\frac{1}{2}]$. Esto confirma una vez más que la impregnación con carboximetilcelulosa al 2% en las condiciones empleadas no da lugar a una reducción importante del desgaste ni siquiera en la bicapas más porosas compactadas a menor presión.



Bicapas 430L

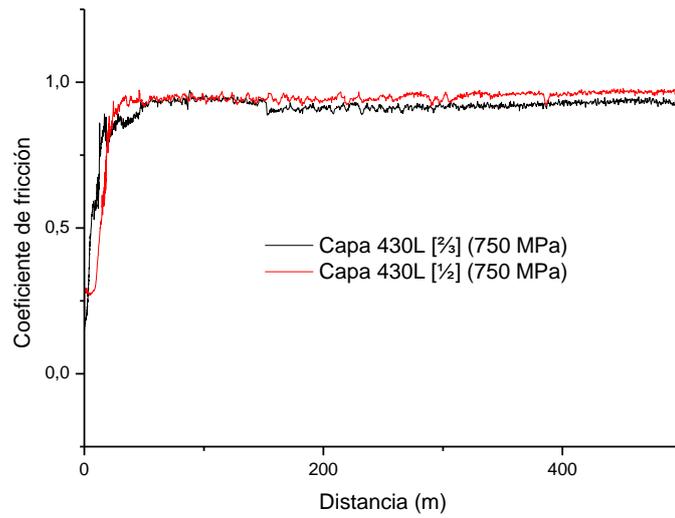
En el caso de las bicapas ferríticas se han realizado ensayos sobre las dos disponibles:

- Bicapa 430L $[\frac{1}{2}-\frac{1}{2}]$ (750 MPa)
- Bicapa 430L $[\frac{2}{3}-\frac{1}{3}]$ (750 MPa)

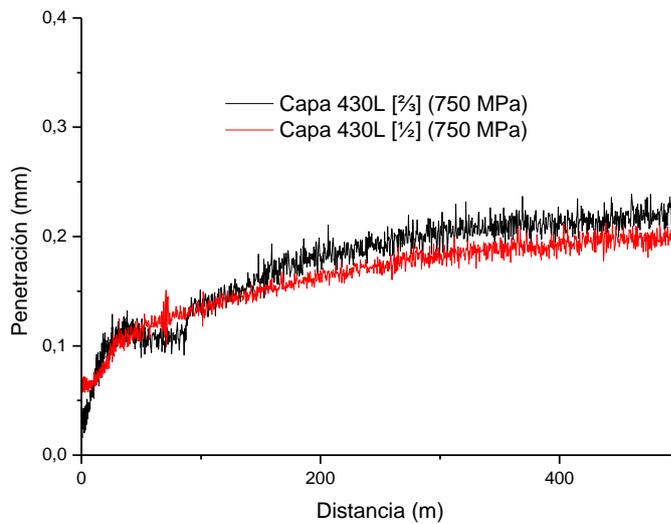
Se ha realizado un análisis por capas, y también se ha comparado la capa atomizada por agua con el acero base 430L.

Capa 430L:

En la comparación del coeficiente de fricción apenas se aprecian diferencias, aunque es levemente más elevado el de la capa de la bicapa con proporción $[\frac{1}{2}-\frac{1}{2}]$.

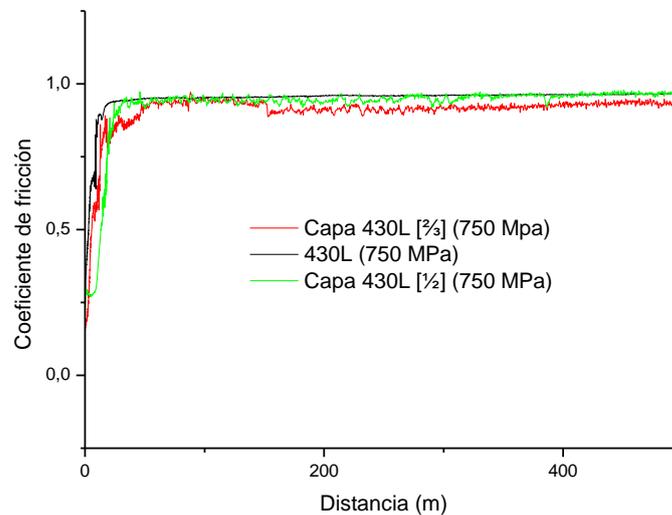


En este caso la penetración es muy similar en ambas bicapas y claramente menor que en las bicapas austeníticas comentadas anteriormente. Este efecto también se observaba en el acero base convencional.

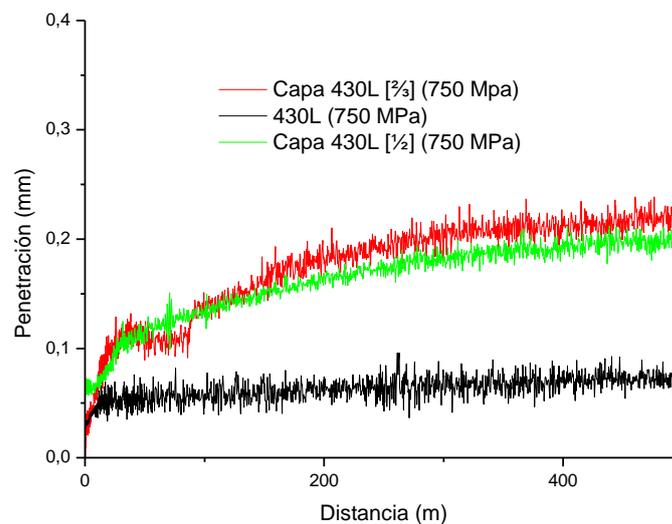


Esta capa también se va a comparar con los aceros base:

En cuanto al coeficiente de fricción, apenas se perciben diferencias entre las capas y el acero base.

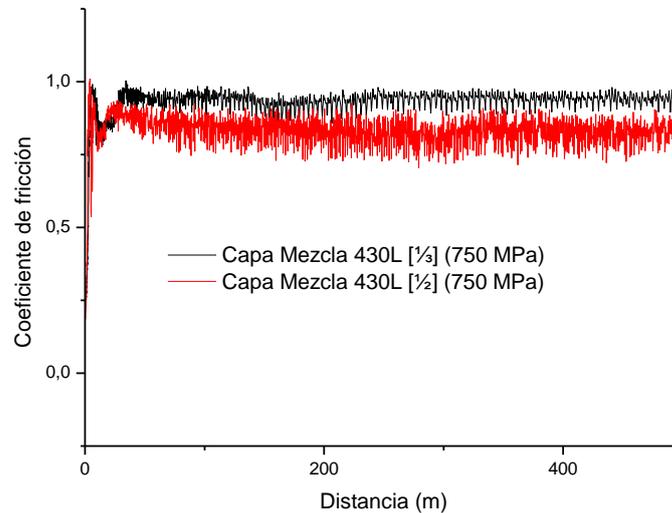


En lo referente a la penetración, se observa una clara diferencia entre el acero base y las capas de atomizado por agua de las diferentes bicapas, además de que ambas tienen un comportamiento similar, puesto que la penetración es prácticamente la misma. Se observa claramente que en este caso la formación de bicapas da lugar a un ligero incremento de la penetración.

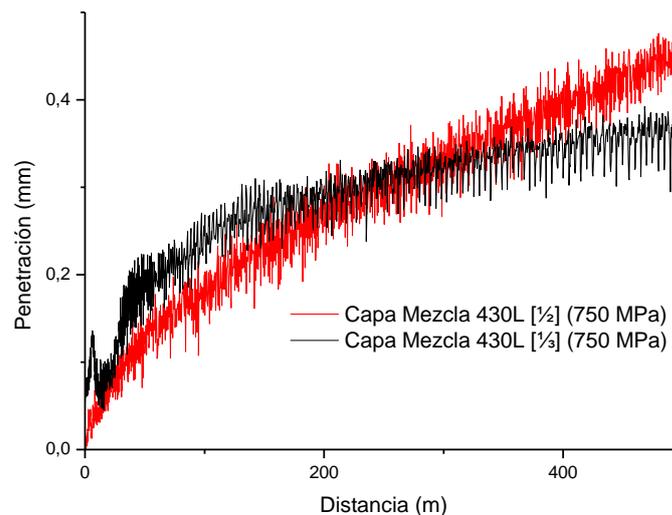


Capa Mezcla 430L

Tras una primera caída en ambos casos, después el coeficiente de fricción es muy parecido en ambos casos. La capa de la mezcla de la bicapa con proporción [1/2-1/2] tiene el coeficiente de fricción algo menor:

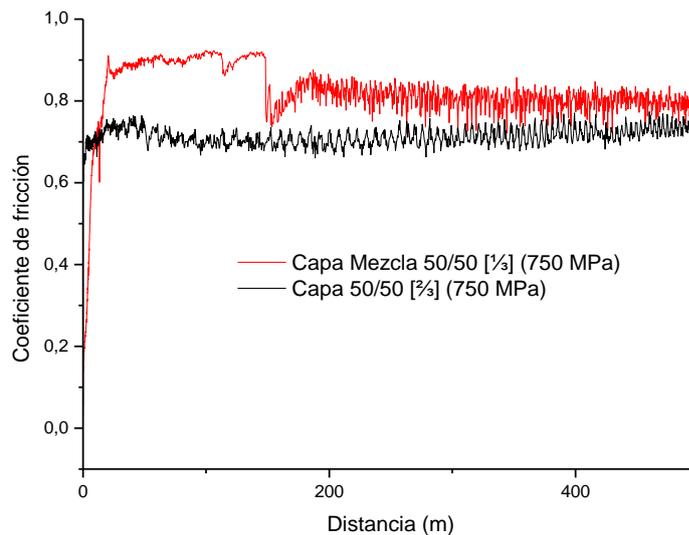


En cuanto a la penetración, hay menos diferencia que antes. Al principio del ensayo hay una mayor penetración en la capa de la mezcla de la bicapa de proporción [2/3-1/3] y al final del ensayo es la capa de la bicapa de proporción [1/2-1/2] la que tiene mayor penetración. En ambos casos la penetración es una vez más del mismo orden de magnitud que en el caso de desgaste seco.

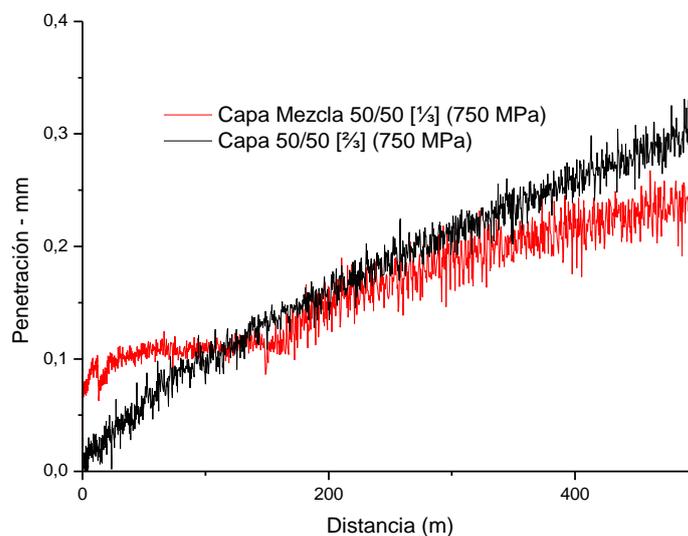


Bicapa 50/50 [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa)

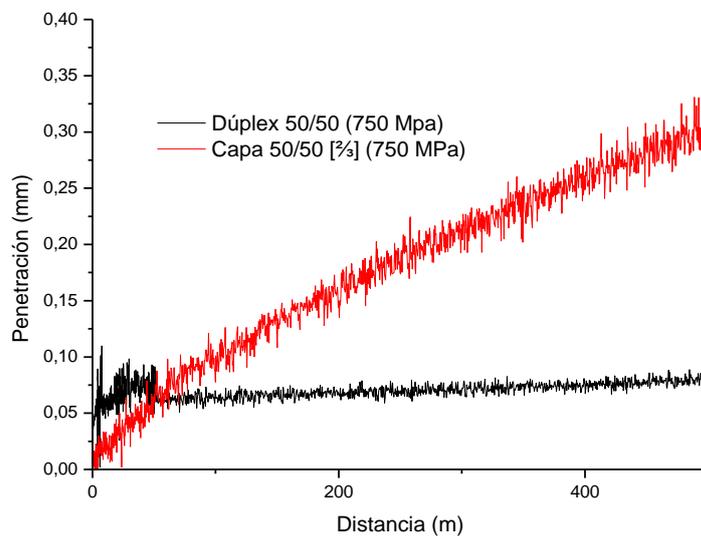
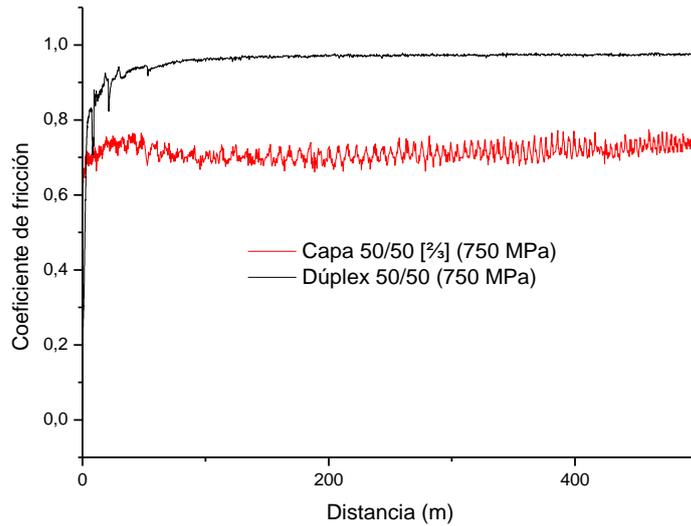
Finalmente analizamos el comportamiento de los aceros dúplex, en este caso la capa de la mezcla tiene un coeficiente de fricción más elevado que la capa del atomizado por agua, con una importante diferencia al principio del ensayo, pero que va disminuyendo (esa diferencia) a medida que avanza el ensayo para alcanzar valores similares a los que se obtenían en la mezcla de aceros dúplex.



En cuanto a la penetración, este ensayo ha tenido un comportamiento similar al del desgaste seco: la penetración al principio es más baja la de la capa del atomizado por agua, pero a medida que avanza el ensayo va creciendo, con lo que al final la capa de la mezcla tiene una penetración menor que la de la capa del atomizado por agua. Los datos una vez más coinciden con los registrados en desgaste seco, con lo que la lubricación interna tampoco ha tenido un efecto visible en el comportamiento frente al desgaste.



Comparando la capa del atomizado por agua con el Dúplex 50/50 a la misma presión de compactación se observa que el coeficiente de fricción varía notablemente, y que la penetración es claramente menor en el Dúplex, observándose una gran diferencia. Luego como en el caso el acero ferrítico la bicapa tiene peor comportamiento frente al desgaste que la mezcla.





5.4.3.2 - Carboximetilcelulosa diluida - Alto vacío

En base a los resultados obtenidos en el apartado anterior que claramente muestran que tanto en los aceros base como en las mezclas o en las bicapas el efecto de la lubricación interna no es observable se concluye que el lubricante no es capaz de llegar al interior del material y por tanto su efecto es meramente superficial y transcurridos las primeras fases del ensayo el comportamiento es similar al del desgaste seco. Para intentar una mayor penetrabilidad se proponen dos actuaciones. La primera es reducir la concentración del lubricante, carboximetilcelulosa, y en segundo lugar potenciar el vacío incrementando las horas de vacío en la Epovac. Los resultados obtenidos se muestran en el siguiente apartado. En un primer apartado se analiza el comportamiento de las muestras con diferente lubricación y en un segundo apartado los resultados obtenidos al modificar el tiempo de vacío.

5.4.3.2.1 - Aceros base y Mezclas

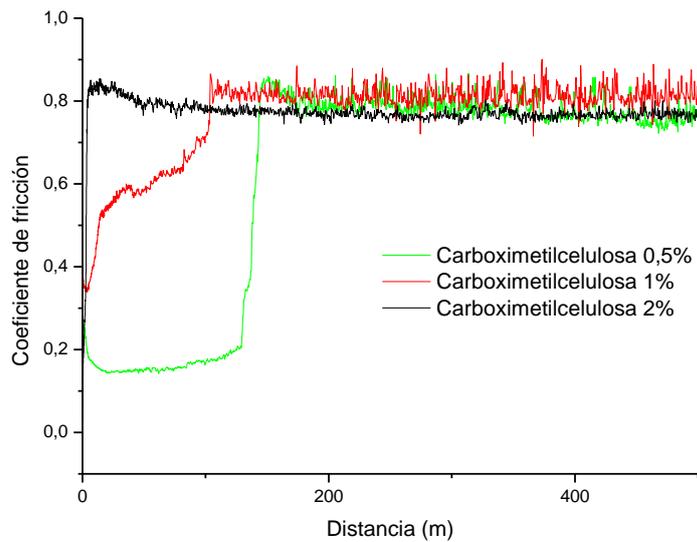
DIFERENTE LUBRICACIÓN

Por el interés que ha suscitado el trabajar con aceros austeníticos con diferente tamaño de grano, se van a comparar los aceros base con la Mezcla Austenítica, usando en los ensayos diferente lubricación para estudiar la posible influencia de la misma en los materiales. Se ha utilizado como lubricante una disolución de Carboximetilcelulosa al 2%, al 1% y al 0.5%, y se ha estudiado la influencia en las muestras a 550 MPa y a 750 MPa.

P = 550 MPa

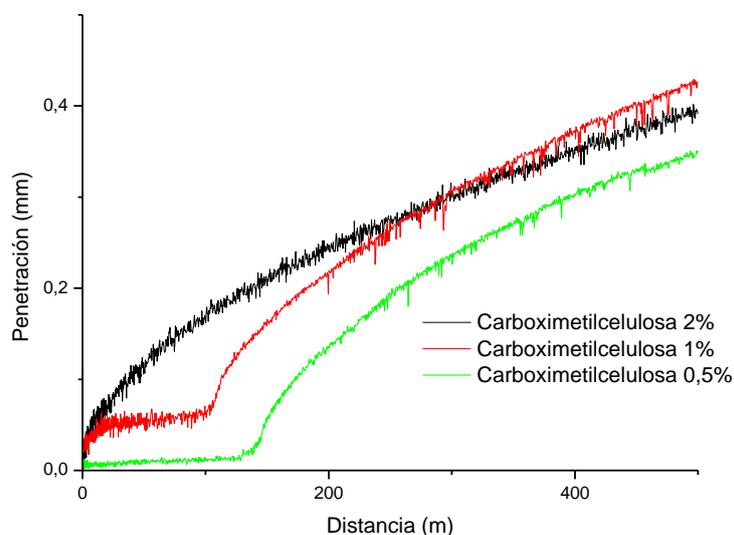
A: 316L [500-710 μm]

En el coeficiente de fricción final no hay diferencias, pero sí en los tramos iniciales. Para el ensayo realizado con el Carboximetilcelulosa al 2% el coeficiente de fricción es alto desde el principio, mientras que con el Carboximetilcelulosa diluido va creciendo poco a poco. Hay un ensayo con el Carboximetilcelulosa al 0.5% donde el coeficiente de fricción es bajísimo hasta 180 metros, y entonces sube.



Esto podría ser indicativo de que la utilización de lubricantes menos viscosos permite la lubricación interna deseada, si bien una vez avanzado el ensayo los propios detritus que se desprenden podrían afectar negativamente, cerrar los poros y hacer que el coeficiente de lubricación adquiriera nuevamente los valores vistos tanto en desgaste seco como con el uso de lubricantes más viscosos. La segunda hipótesis sería que el lubricante llena los poros de la zona periférica y una vez desgastada esta zona la región interna no tiene lubricación y por tanto su comportamiento es similar al del desgaste seco.

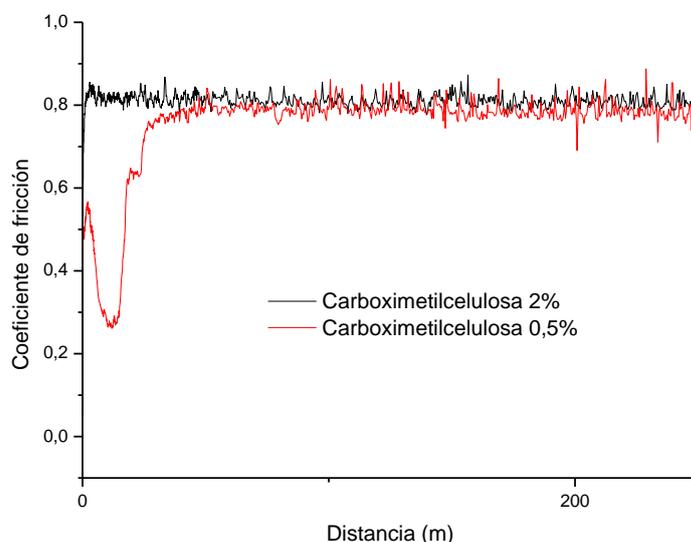
La penetración sí se ve afectada. Es muy baja en las etapas iniciales, pero luego crece y adopta valores similares a la del ensayo con la Carboximetilcelulosa al 2%, que son prácticamente iguales a los del ensayo del desgaste seco. Debemos fijarnos que en las primeras fases del ensayo donde la penetración es muy reducida y podemos concluir que la lubricación es efectiva.



Al obtener resultados más interesantes usando una disolución de Carboximetilcelulosa al 0.5% y viendo que el efecto se observa en la primera mitad del ensayo, incluso antes, a partir de ahora se van a realizar los ensayos con esta disolución y realizando un recorrido de 250 metros en vez de 500.

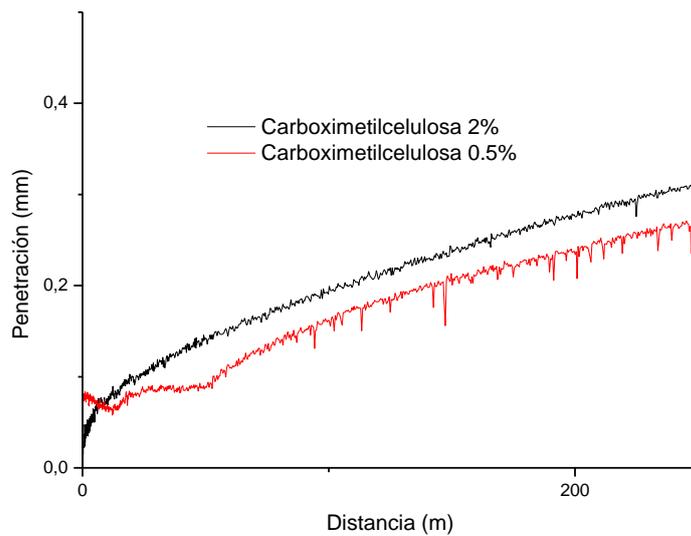
B: 316L [300-500 μm]

Los coeficientes de fricción de los ensayos realizados con Carboximetilcelulosa al 0.5% en las primeras fases del ensayo bajan en las primeras etapas del ensayo aunque a medida que prosigue el mismo alcanzan los valores estándar.



Cuando se limpia la probeta y se vuelve a repetir el ensayo cada vez es menor el tiempo que necesita para alcanzar el valor estándar. No obstante, dado que se registra un coeficiente de fricción muy bajo en las primeras fases del ensayo, sí se puede hablar de lubricación interna, pero una vez superado un límite, como ya se comentó, es posible que con el desgaste acumulado de detritos se cierren algunos poros y se pierda el efecto lubricador.

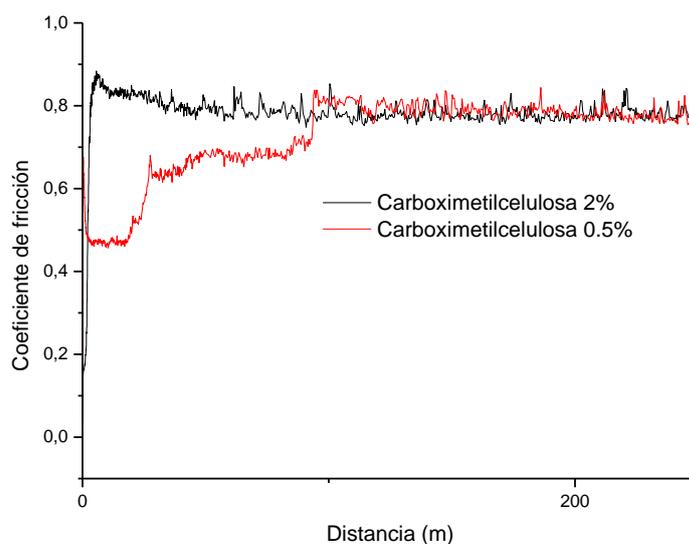
En la penetración se ve claramente que la muestra inicialmente impregnada con Carboximetilcelulosa al 0.5% tiene una penetración nula en las primeras fases del ensayo y luego crece.



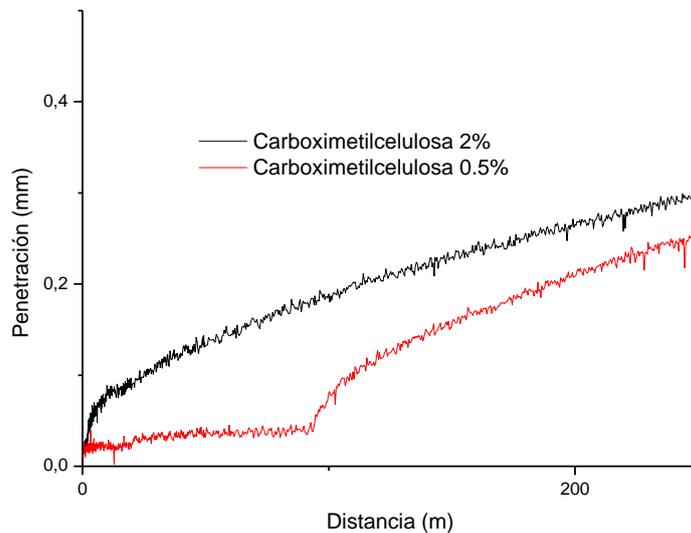
Comparando el comportamiento de los dos aceros se ve claramente que el efecto de lubricación interna es mucho más observable en el acero austenítico obtenido a partir de polvo de tamaño de partícula grueso en el que la porosidad era máxima.

C: Mezcla Austenítica

La evolución del coeficiente de fricción es similar al caso anterior: éste baja en los primeros metros del ensayo con respecto al ensayo realizado con Carboximetilcelulosa al 2%, pero luego se obtienen valores similares siguiendo el mismo comportamiento que el de los aceros utilizados en la fabricación de la mezcla.



La evolución de la penetración es idéntica a los otros casos:

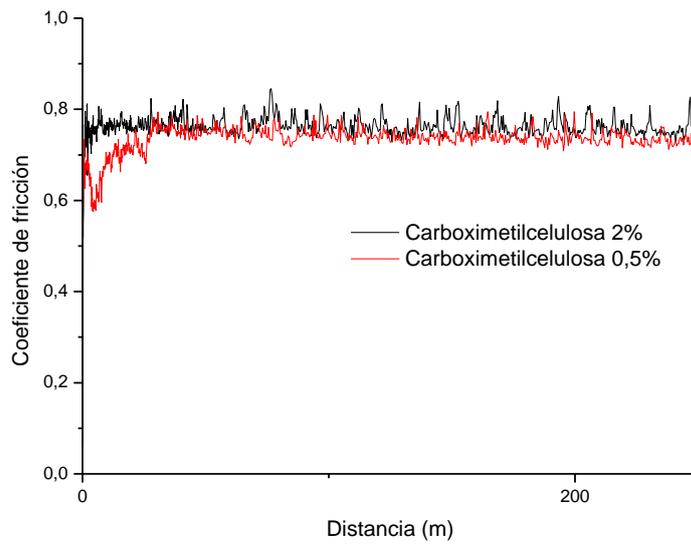


Por lo tanto parece claro que con una disolución de Carboximetilcelulosa al 0.5% en las muestras compactadas a 550 MPa hay lubricación interna, pero a medida que avanza el ensayo desaparece el efecto autolubricador, aunque si se limpia bien la muestra y se vuelve a realizar el ensayo sobre ella aparece de nuevo. Luego parece que el lubricante está, pero debido a los detritos procedentes del mismo ensayo el efecto autolubricador desaparece, más que pensar que la lubricación sólo afecta a las capas más periféricas de las muestras.

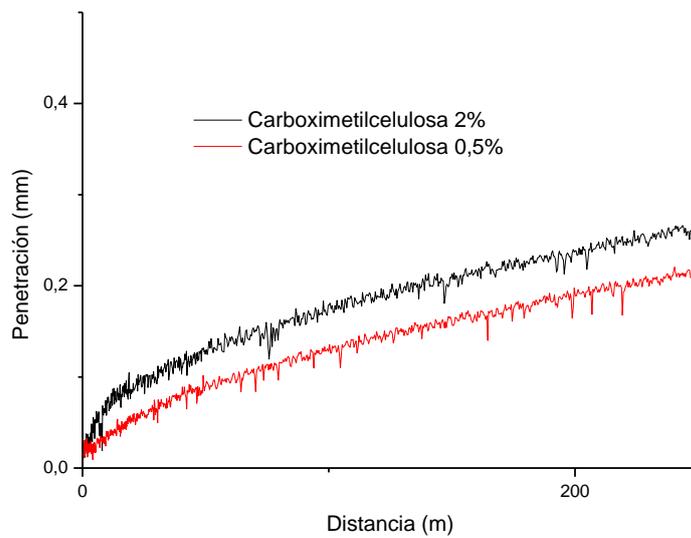
P = 750 MPa

A: 316L [500-710 μm]

El efecto es mucho menor en el coeficiente de fricción que para las muestras compactadas a 550 MPa, luego la porosidad, en este caso la presión de compactación, es decisiva. Solamente para la primera se ve una ligera disminución en los primeros tramos del coeficiente de fricción. Esto refuerza la idea que para conseguir lubricación interna es preciso trabajar con muestras altamente porosas, hecho que ya se demostró al comparar las diferencias entre los materiales con diferentes tamaños de partícula de polvos compactados a 550MPa.

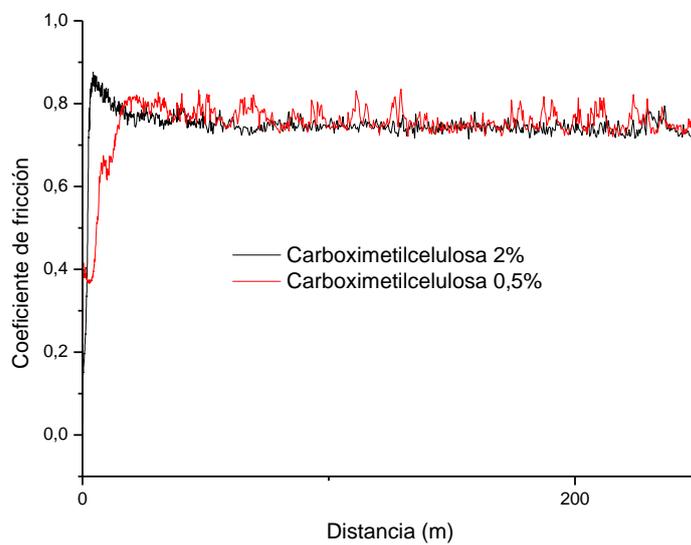


En la penetración, en cambio, sí se observa un cierto efecto beneficioso aunque no es tan notable como en las muestras porosas donde el desgaste era mínimo.

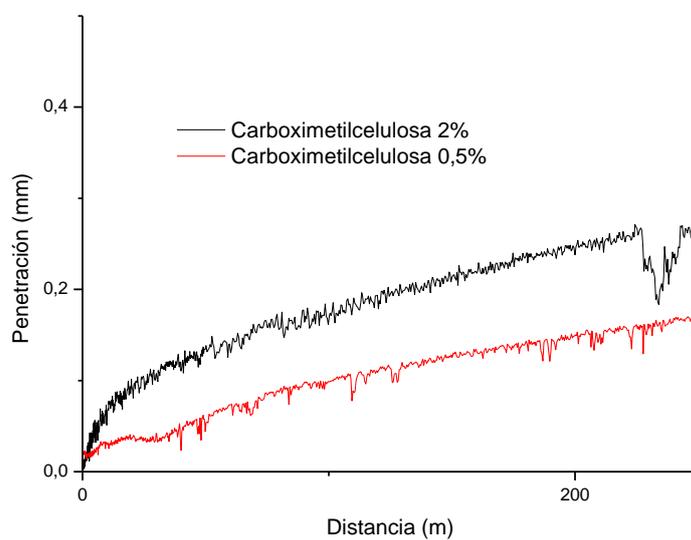


B: 316L [300-500 μm]

Como era previsible, el efecto beneficioso de la lubricación interna es todavía menos evidente en el coeficiente de fricción que en la anterior muestra.

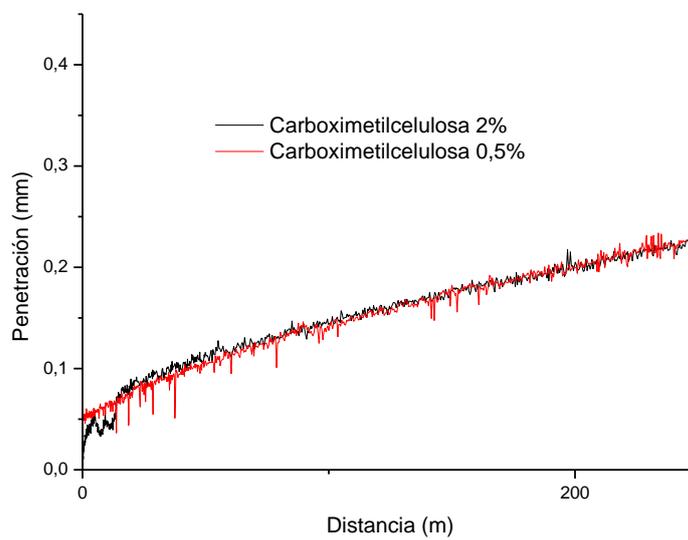
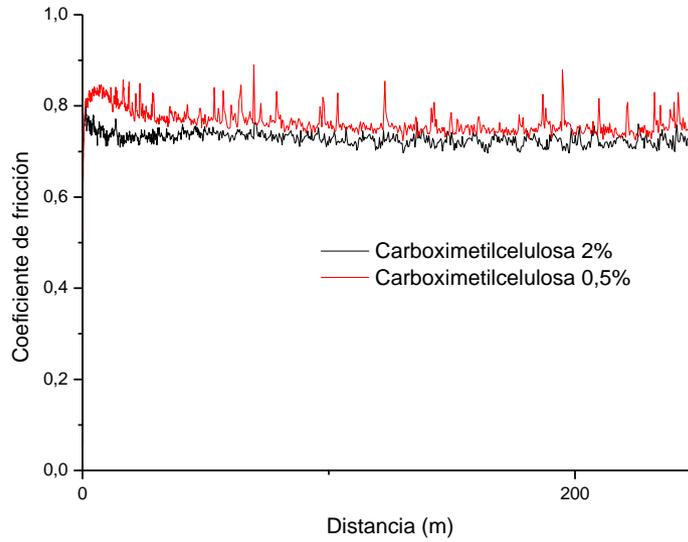


A nivel de penetración sí se observa una reducción de la resistencia al desgaste pero mucho menor que la registrada en la misma muestra compactada a menor presión.



C: Mezcla Austenítica

Para esta presión de compactación en la figura podemos apreciar que no hay ningún efecto en el coeficiente de fricción, y tampoco en la penetración. En la figura que se muestra a continuación se observa la plena coincidencia entre los dos ensayos realizados con diferente concentración de lubricante.





DIFERENTE TIEMPO DE VACÍO

Se ha decidido someter a los materiales austeníticos más porosos compactados a 550 MPa a ensayos de desgaste con lubricación interna usando como lubricante Carboximetilcelulosa al 0.5%, pero variando los tiempos que permanecen en el equipo de impregnación al vacío: desde media hora, tres horas y doce horas.

En algunas de las muestras se ha realizado un estudio de permeabilidad con el fin de evaluar la absorción que hacen las muestras del lubricante.

A: 316L [500-710 μm]

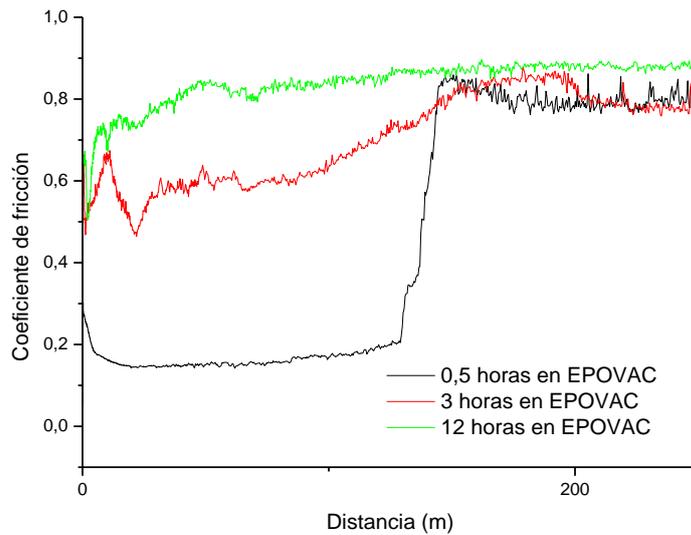
Se ha comenzado con esta muestra debido a que es la que mayor porosidad superficial posee. Se trata de polvos de tamaño de partícula grueso con presión de 500MPa.

Se han pesado las muestras antes de introducirlas en la Epovac y después, para medir el grado de impregnación, y los resultados son los siguientes:

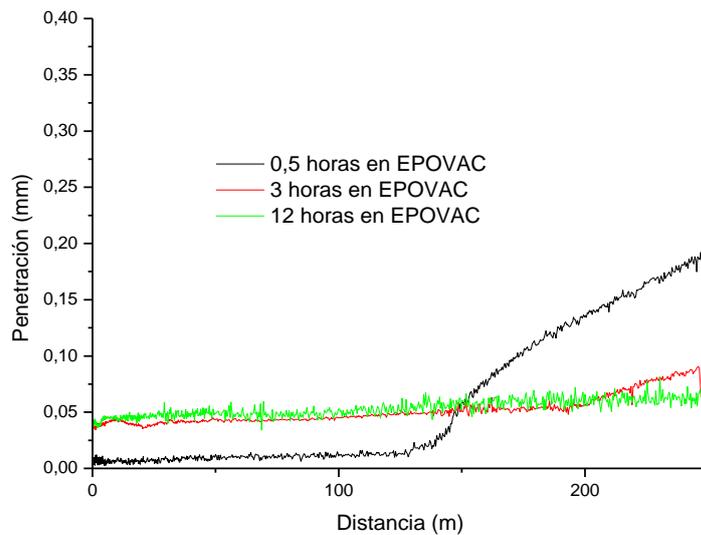
- **316L [500 – 710 μm] (550 MPa) – (Carboximetilcelulosa 0.5% - 3 horas en EPOVAC)**
 - P1 = 2.7447 g
 - P2 = 2.8098 g
 - **$\Delta P = 0.0651$**

- **316L [500 – 710 μm] (550 MPa) – (Carboximetilcelulosa 0.5% - 12 horas en EPOVAC)**
 - P1 = 2.6719 g
 - P2 = 2.7215 g
 - **$\Delta P = 0.0496$ g**

El coeficiente de fricción de la muestra que ha permanecido en la Epovac durante media hora es el que permanece más bajo durante más tiempo. Después el de tres horas y el de doce horas que se ha colocado de canto en el molde el coeficiente de fricción es alto desde el principio, luego no se puede hablar de que exista una tendencia clara.



En cuanto a la penetración sí que se ve que es muy baja en las de tres y doce horas, mientras que en la de media hora también es baja al principio, pero después sube mucho.

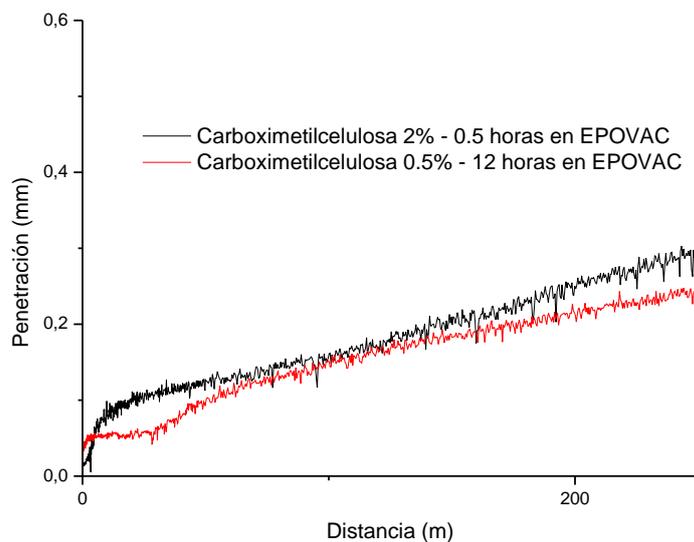


De lo anterior se puede concluir que en el caso de 3 y 12 horas de mantenimiento en la EPOVAC la resistencia al desgaste claramente mejora, con lo que podemos afirmar que para esta muestra con alto grado de porosidad se ha conseguido introducir el lubricante en los poros y que éste tenga el efecto aconsejable. En el caso del coeficiente de fricción no se observan cambios importantes una vez que transcurren las primeras fases del ensayo, con lo que el efecto de los detritus en el comportamiento frente a la fricción debe ser decisivo.

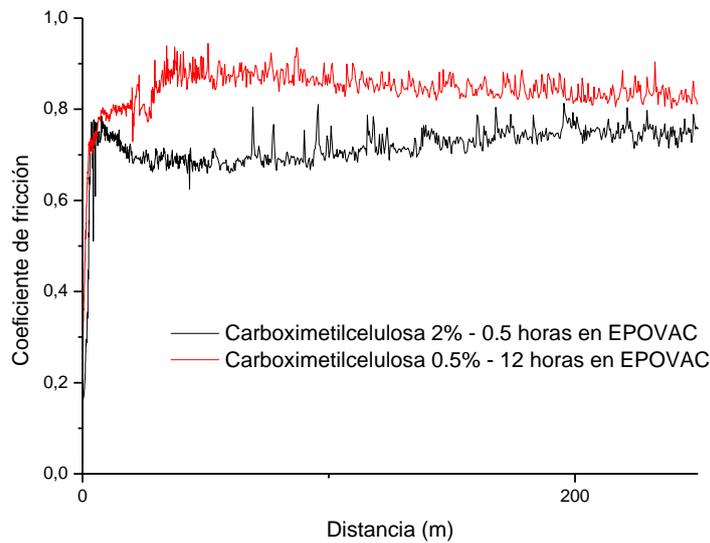
B: 316L (tamaño de grano estándar)

- **316L (550 MPa) – (Carboximetilcelulosa 0.5% - 12 horas en EPOVAC)**
 - P1 = 4.3461 g
 - P2 = 4.3556 g
 - **$\Delta P = 0.00952$ g**

En este caso el que haya estado la muestra durante más tiempo en vacío no afecta. La porosidad no es lo suficientemente alta como para que la disolución de Carboximetilcelulosa penetre, aunque esté muy diluida o aunque el tiempo de vacío aumente. De hecho el ensayo de permeabilidad indica que apenas hay penetración en el material. En este caso debe tratarse de porosidad cerrada y por tanto, tal y como se muestra en la gráfica adjunta, la penetración sólo se mantiene en valores bajos en el principio del ensayo, correspondiente a la zona superficial y por tanto no hay penetración del lubricante en el interior.



Los coeficientes de fricción son incluso más altos que para el ensayo con Carboximetilcelulosa al 2%.

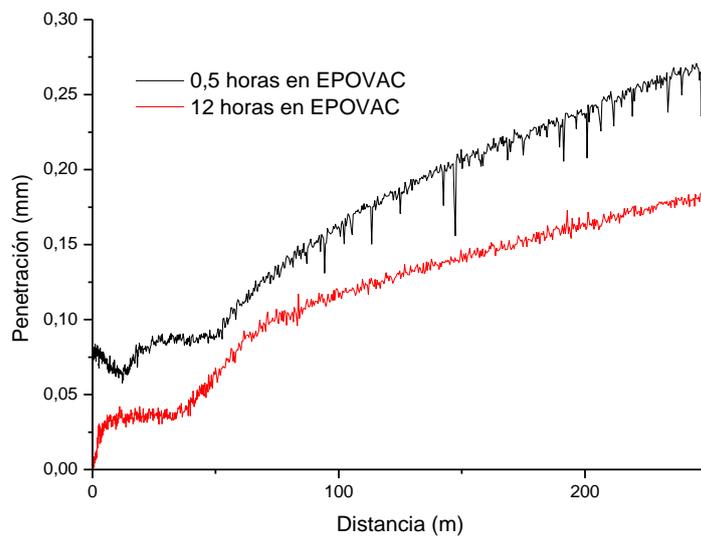
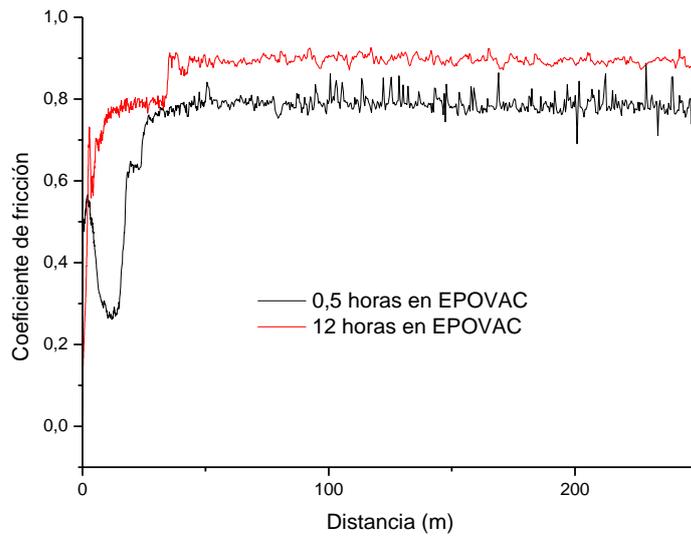


C: 316L [300-500 μm]

Los resultados del ensayo de permeabilidad son los siguientes:

- **316L [300 – 500 μm] (550 MPa) – (Carboximetilcelulosa 0.5% - 12 horas en EPOVAC)**
 - P1 = 3.0223 g
 - P2 = 3.1043 g
 - **$\Delta P = 0.082$ g**

El coeficiente de fricción es mayor cuando la muestra ha estado durante más tiempo en la EPOVAC, pero en la penetración sí que se nota el efecto beneficioso aunque en menor medida que en el caso de la muestra con mayor tamaño de partícula. Se observa que la penetración disminuye cuanto más tiempo ha permanecido la muestra en el equipo de impregnación, pero no alcanza los valores tan bajos como los registrados en la muestra anterior. También se observan diferencias entre las distintas fases del ensayo que nos sugieren que, si bien el lubricante ha penetrado más que en el acero convencional, no ha conseguido rellenar por completo los poros a pesar de utilizar lubricante diluido y máximo tiempo de impregnación.

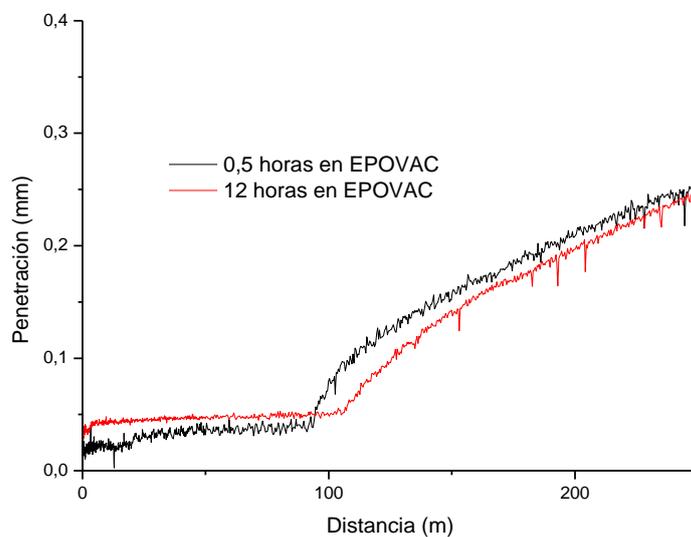
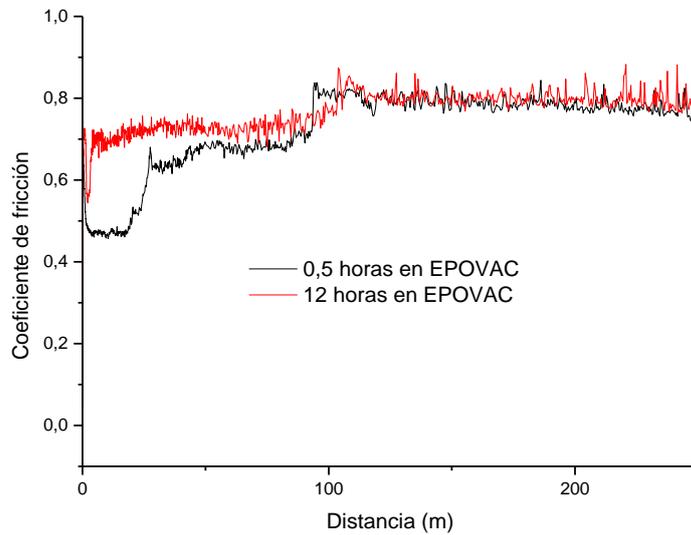


D: Mezcla Austenítica

Realizando el ensayo de permeabilidad se obtiene:

- **Mezcla Austenítica (550 MPa) – (Carboximetilcelulosa 0.5% - 12 horas en EPOVAC)**
 - P1 = 2.5857 g
 - P2 = 2.6634 g
 - **$\Delta P = 0,0777$ g**

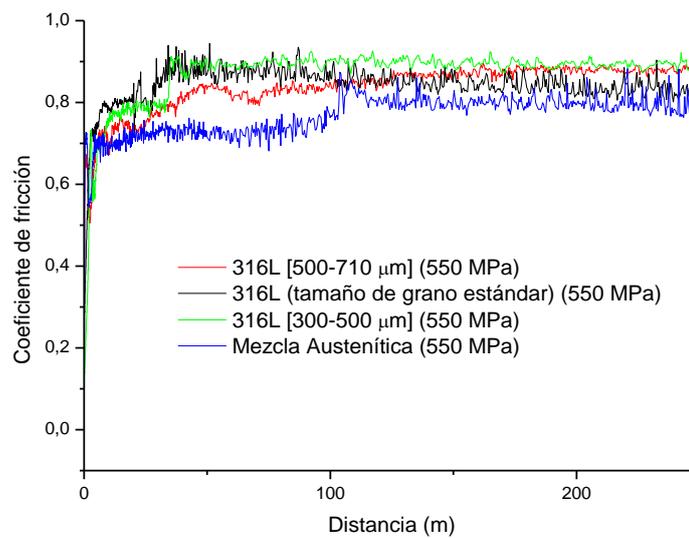
En los primeros instantes del ensayo hay alguna diferencia en cuanto al coeficiente de fricción, pero a medida que avanza el ensayo se igualan, incluso la dinámica es la misma. Ocurre lo mismo con la penetración, que es prácticamente igual, luego en este caso el efecto es más notable en las primeras fases del ensayo pero no parece existir lubricación en el interior de la probeta.



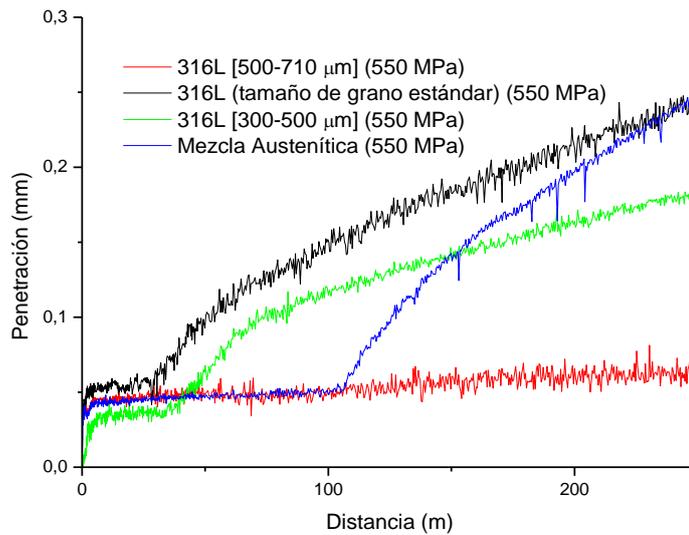
Comparación de los austeníticos:

Comparando todos los aceros 316L con diferentes tamaños de grano y la Mezcla Austenítica, todos ellos compactados a 550 MPa, que han permanecido en el equipo de impregnación 12 horas y han sido lubricados con una disolución de Carboximetilcelulosa al 0.5% se obtiene lo siguiente:

El coeficiente de fricción es similar en todos los casos, si bien al principio del ensayo la Mezcla Austenítica es la que presenta un valor menor pero al final todos tienen un valor similar.



En cuanto a la penetración, aquí sí que se obtienen resultados relevantes, puesto que se observa que la muestra con mayor porosidad es la que presenta mejor comportamiento frente al desgaste presentando una penetración constante durante todo el ensayo y muy baja consiguiéndose por tanto el objetivo propuesto.



5.4.3.2.2 - Bicapas

Bicapa 316L

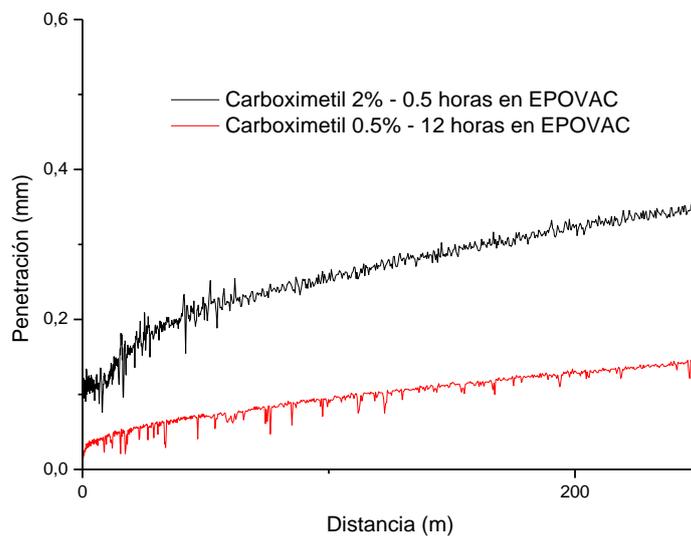
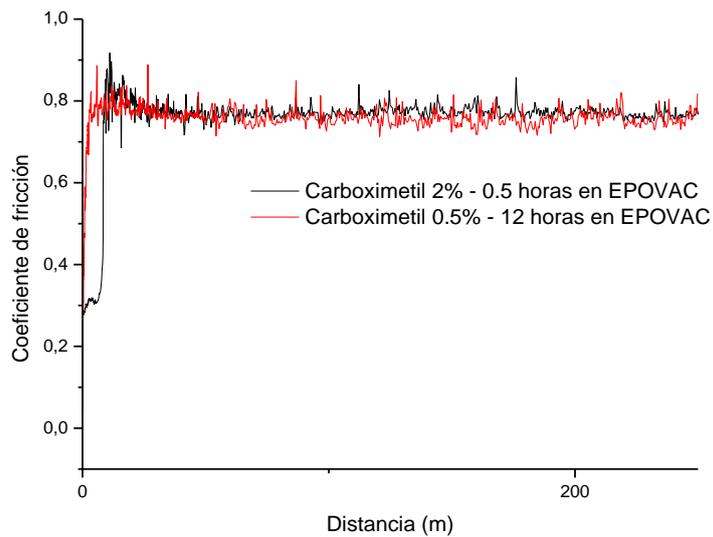
Se ha realizado el ensayo con la Bicapa 316L [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa), dejándola durante doce horas en el equipo de impregnación al vacío y usando como lubricación una disolución de Carboximetilcelulosa al 0.5% y se la ha comparado con el ensayo inicial, con Carboximetilcelulosa al 2% y media hora en vacío.

En primer lugar, se exponen los resultados del ensayo de permeabilidad:

- **Bicapa 316L [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa) – (Carboximetilcelulosa 0.5% - 12 horas en EPOVAC)**
 - P1 = 4.3668 g
 - P2 = 4.4231g
 - **$\Delta P = 0.0563$ g**

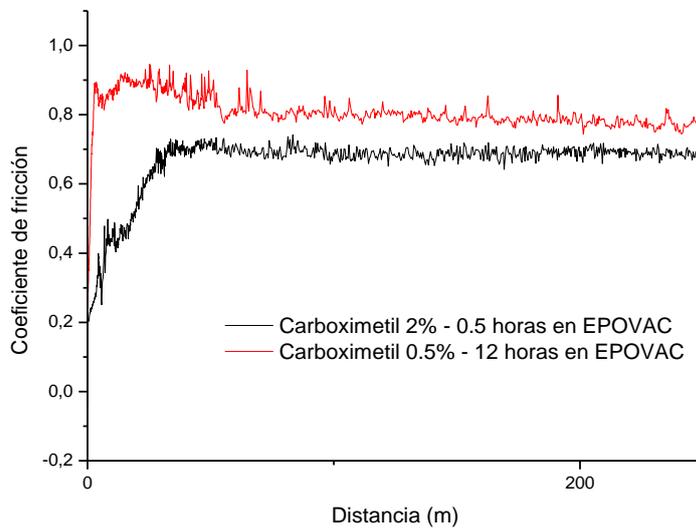
Capa Mezcla 316L [1/3]

El coeficiente de fricción sale exactamente igual que el que se obtuvo en las otras condiciones, pero en la penetración sí que se observa un efecto claro, puesto que la penetración es mucho menor, se nota por tanto el efecto de la lubricación interna. Se obtienen valores bajos pero no tan reducidos como en el caso de los aceros con grano grueso o intermedio.

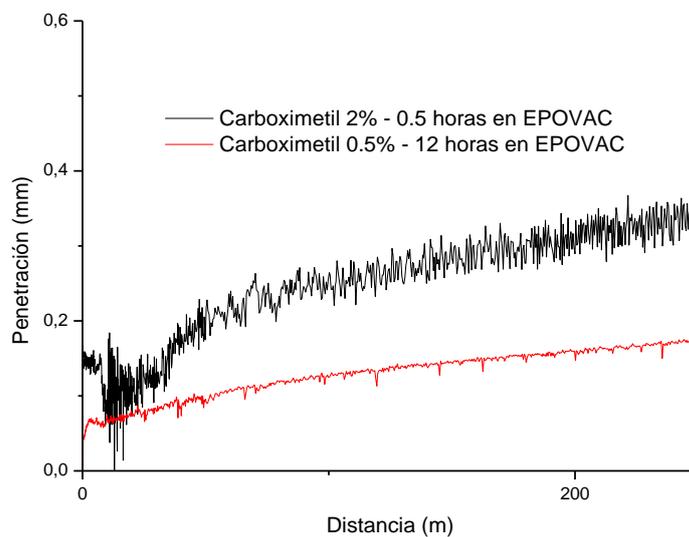


Capa 316L [2/3]

Se observa que el coeficiente de fricción es incluso más alto al principio del ensayo, aunque posteriormente es similar al del ensayo con las condiciones anteriores.



En la penetración sí que se ve el efecto, puesto que se ve que se reduce claramente con las nuevas condiciones de lubricación y vacío, aunque una vez más no se llegan a los valores tan reducidos observados en la muestra obtenida con tamaño de partícula grueso.



Bicapa Austenítica

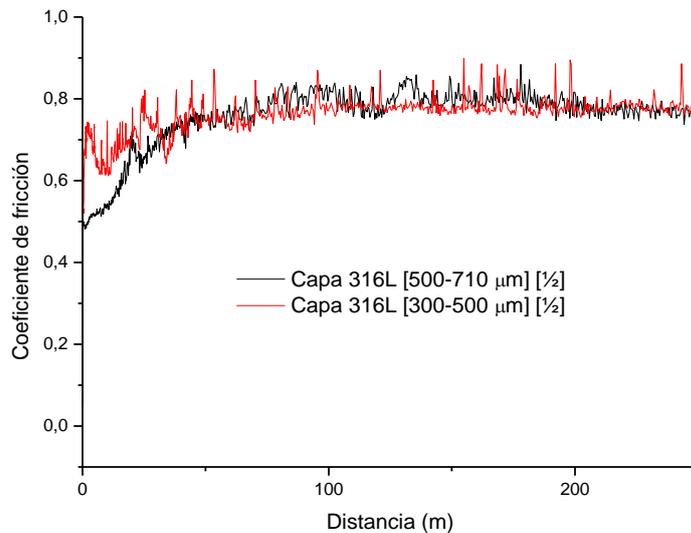
Finalmente se realiza el ensayo de la Bicapa Austenítica obtenida a partir de polvos de partícula grueso/intermedio, dejando la muestra durante 12 horas en el equipo de impregnación y usando como lubricante una disolución de Carboximetilcelulosa al 0.5%.

Con el ensayo de permeabilidad realizado se obtienen lo siguiente:

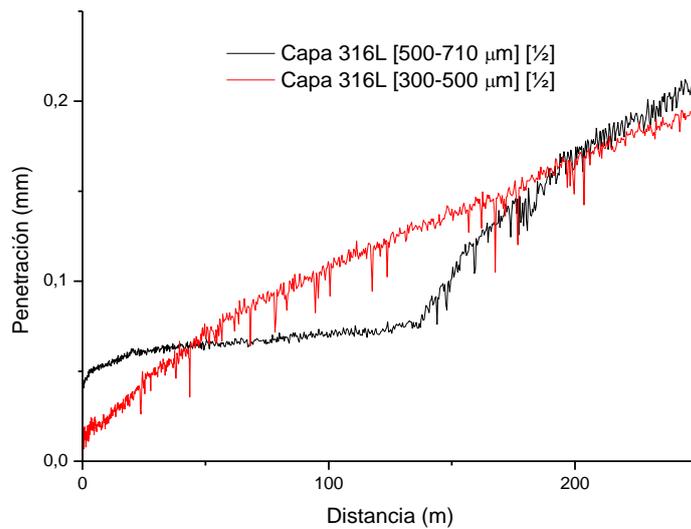
- **Bicapa Austenítica [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (550 MPa) – (Carboximetilcelulosa 0.5% - 12 horas en EPOVAC)**
 - P1 = 2.5904 g
 - P2 = 2.6625 g
 - **$\Delta P = 0,0721$ g**

En primer lugar se van a comparar ambas capas:

Se observa que el coeficiente de fricción es muy similar en ambas capas



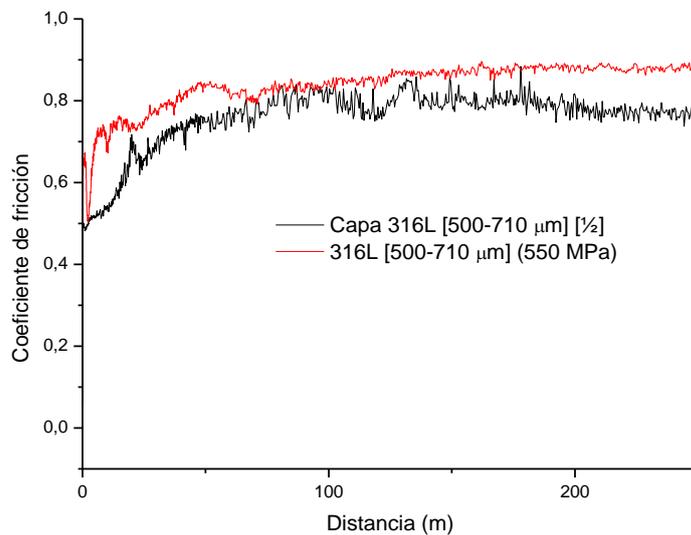
En cuanto a la penetración, se puede comprobar que es más uniforme en el caso de la capa de tamaño de grano intermedio, mientras que en la capa de tamaño de grano grueso durante la primera mitad del ensayo hay una penetración muy baja, para posteriormente aumentar y llegar al nivel de la otra capa. Por tanto se concluye que la mejora que se ha conseguido con lubricación interna es similar a la registrada en la muestra obtenida con polvo de partícula grueso, pero como consecuencia de la interdifusión entre los dos polvos este efecto no es continuo durante todo el ensayo, sino que afecta a aproximadamente la mitad del ensayo.

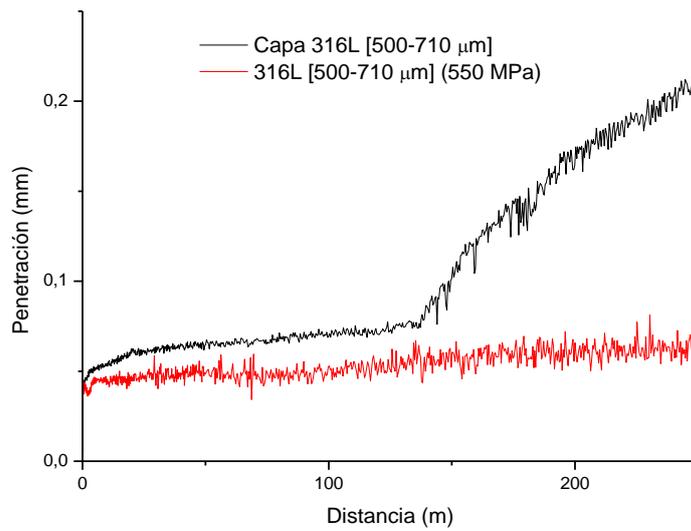


Para observar esto con más detalle se compara cada capa se va a comparar con la muestra de acero base correspondiente:

Capa 316L [500-710 μm]

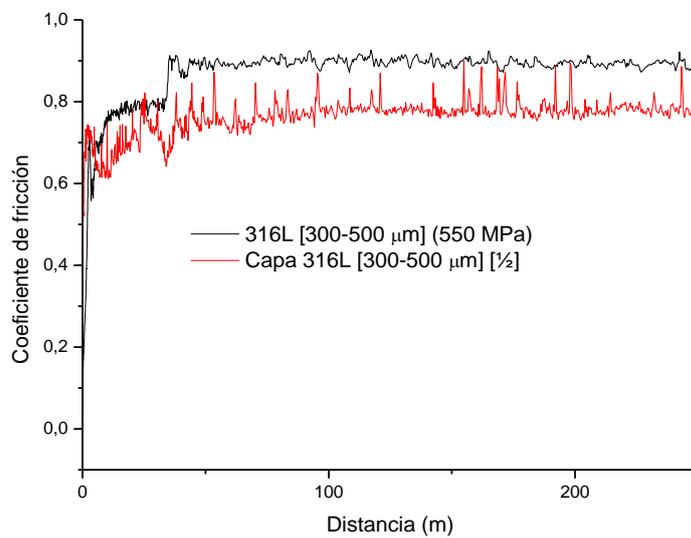
El coeficiente de fricción oscila entre los mismos valores. En cambio la penetración es similar inicialmente, pero sobre la mitad del ensayo aumenta considerablemente alcanzando valores similares a los registrados en la otra capa de la bicapa.

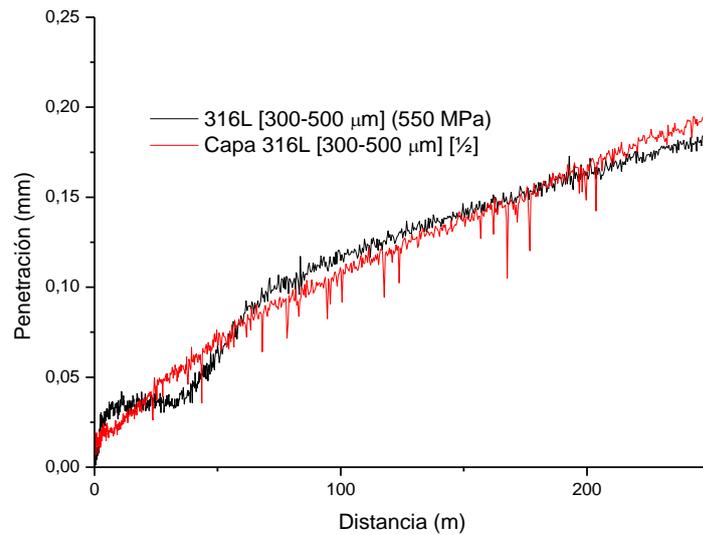




Capa 316L [300-500 μm]

El coeficiente de fricción es algo superior en la muestra del acero base que en la capa de la Bicapa Austenítica, pero la penetración es prácticamente idéntica





Finalmente como conclusión podemos señalar que las mejores condiciones de desgaste se obtienen para la muestra obtenida a partir de tamaño de partícula entre 500-710 micras compactada a 55 0MPa utilizando como lubricante carboximetilcelulosa al 0.5% y utilizando tiempos de impregnación más prolongados. Este efecto beneficioso puede observarse también en la bicapa correspondiente, con lo que resulta factible la utilización de bicapas con diferentes grados de porosidad para su uso como prótesis desde el punto de vista de su resistencia al desgaste.



CONCLUSIONES



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

PROYECTO FIN DE CARRERA



6 - CONCLUSIONES

1. En cuanto a la porosidad superficial se observa que el factor más relevante es el tamaño de partícula: las muestras con tamaño de partícula más grande son las que presentan mayor porosidad. La presión de compactación es igualmente relevante: cuanto menor es la presión de compactación, mayor es la porosidad superficial. En las mezclas dúplex se obtienen menor porosidad superficial que en los materiales de partida, mientras que las mezclas austeníticas presentan mayor porosidad que los materiales de referencia. En cuanto a las bicapas, se observan ligeras diferencias entre las capas de acero atomizado por agua y las de mezcla con atomizados, por gas pero no son muy significativas y sólo las bicapas con tamaños diferentes de grano dan lugar a elevadas porosidades.
2. El área de los poros sigue un comportamiento análogo al de la porosidad superficial en el caso de los aceros homogéneos y mezclas. En el caso de las bicapas no existen grandes diferencias, si bien el área de los poros es más elevada en la bicapa que en el material homogéneo cuando se trabaja con presiones de compactación más altas y hay menor cantidad de mezcla en la bicapa. Con respecto a las bicapas obtenidas a partir de mezclas, en el caso de mezclas de composiciones, aceros dúplex, los poros son ligeramente más grandes en la bicapa, mientras que para las mezclas de tamaños diferentes se observa que los poros se reducen de tamaño en las bicapas.
3. La caracterización microestructural revela que la microestructura de los aceros pulvimetalúrgicos es compleja y el grado de precipitación de nitruros de cromo es altamente dependiente de la composición de los polvos, del método de obtención de los polvos, de la composición de la mezcla, y de las condiciones de obtención de las bicapas.
4. Las propiedades mecánicas de los diferentes materiales pueden ser evaluadas mediante los ensayos de macro y microdureza. Al respecto, indicar que los ensayos de macrodureza están mucho más influenciados por el grado de porosidad y por tanto se observa que los más porosos son los que presentan menor dureza. La microdureza está menos influenciada por el grado de porosidad y se observa que las mezclas dúplex presentan mayor dureza que los aceros de partida y que en el caso de las bicapas se observa que la mezcla con polvos de acero atomizado por gas origina un cierto endurecimiento.
5. Son los aceros Dúplex 50/50 los que presentan mejor comportamiento frente al desgaste, siendo el acero austenítico convencional el que presenta mayor penetración. Respecto al efecto de la porosidad y la presión de compactación se observa que las muestras más compactas tienen menores penetraciones siendo esto mucho más evidente para las muestras menos resistentes al desgaste. Respecto a la formación de bicapas, tanto las austeníticas generadas a partir de mezclas con diferentes tamaños de partícula como en bicapas obtenidas con mezclas de polvos atomizados por gas se observa una clara mejora respecto a los materiales de referencia.



6. La lubricación discontinua con Carboximetilcelulosa tiene un efecto altamente beneficioso en la resistencia al desgaste y a la fricción. La composición dúplex sigue presentando mejor comportamiento que los aceros ferríticos y austeníticos de partida. Los aceros inoxidable austeníticos de tamaño de partícula mayor presentan mejor comportamiento al desgaste que los convencionales. Las bicapas austeníticas con mezclas de polvos de tamaños de partícula suponen una mejora en el comportamiento tribológico respecto a los aceros convencionales, la bicapas con polvos atomizados por gas presentan un comportamiento similar a los aceros de referencia.
7. La autolubricación interna exige de materiales con alto grado de porosidad y elevado tamaño de poro, esto es, materiales fabricados a partir de polvos con tamaño de partícula superior a las 500 micras. Además de alta permeabilidad es necesario emplear lubricantes con bajo grado de viscosidad y altas condiciones de vacío para conseguir la lubricación interna. Los materiales autolubricados conseguidos en estas condiciones presentan un excepcional comportamiento tribológico.



ANEXOS



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

PROYECTO FIN DE CARRERA



Anexo 1

Porosidad y Área de los poros



Universidad de Valladolid

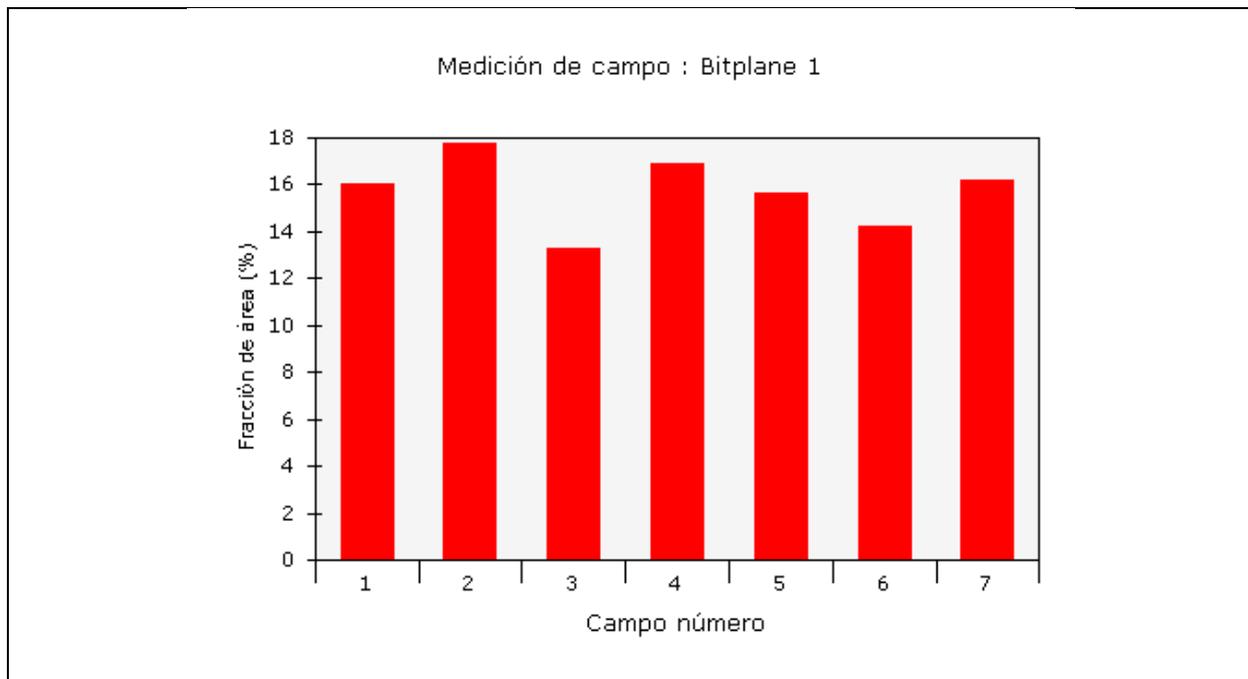
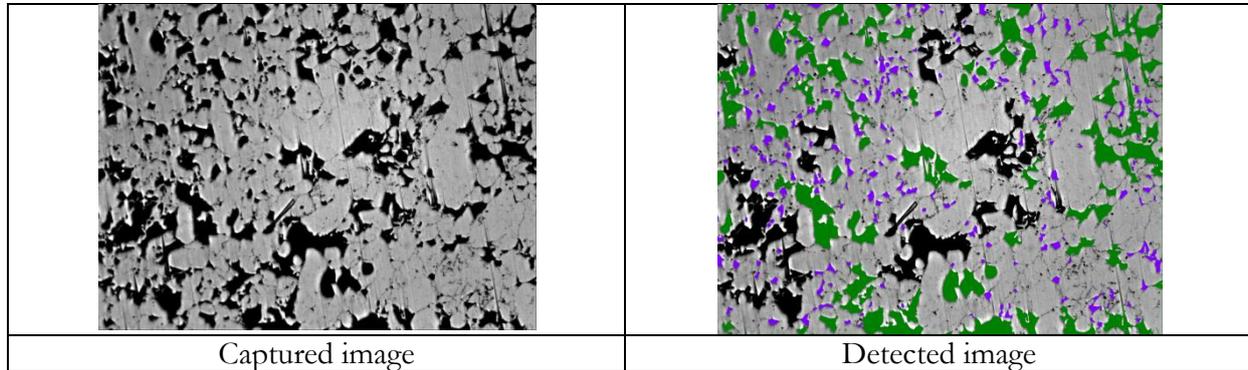


ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

PROYECTO FIN DE CARRERA

430L (550 MPa) - Porosidad superficial

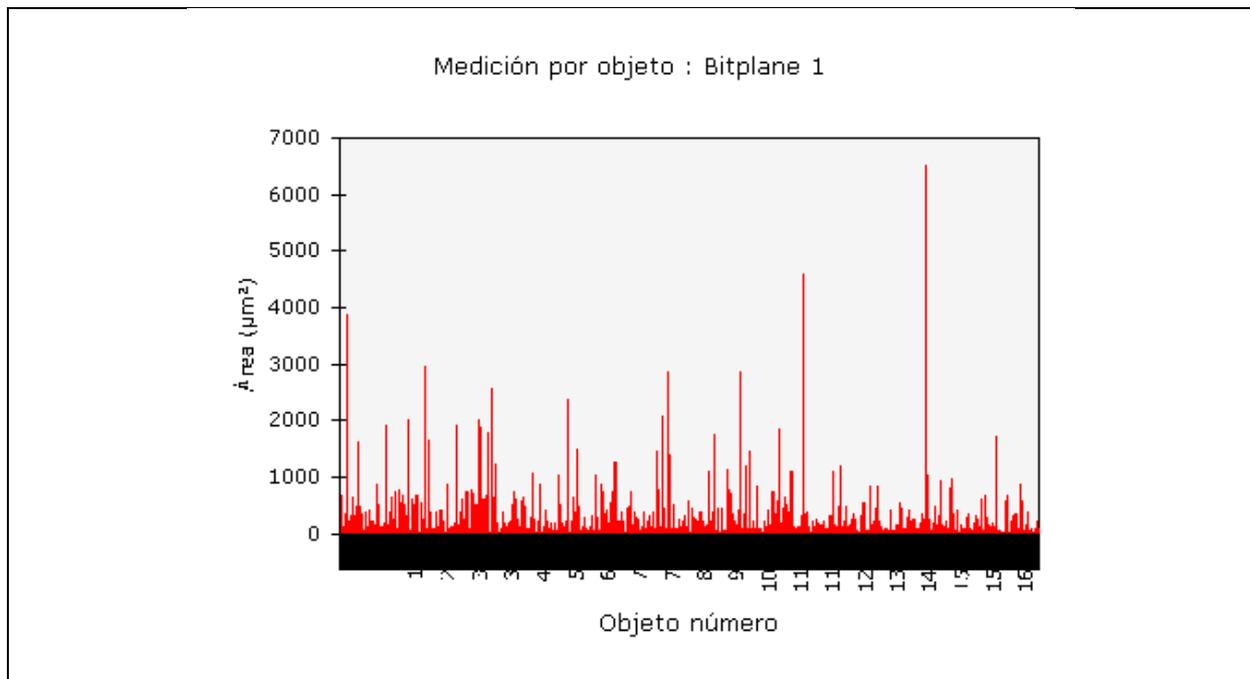
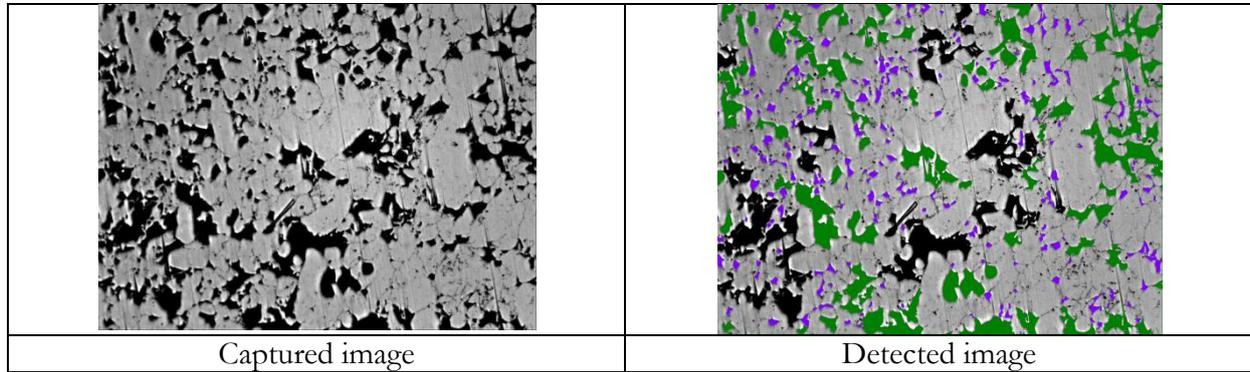
Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-04-18	Magnification:	100x



Measurement name:	Medición de campo	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	15,7111 %	Std dev:	1,4081 %
Total:	109,9777 %	95% CI:	1,30 %
Min:	13,2688 %	% RA:	8,29 %
Max:	17,7250 %	No fields of view:	7
Data points:	7	Total area analyzed:	1550948,65 μm^2

430L (550 MPa) - Área de los poros

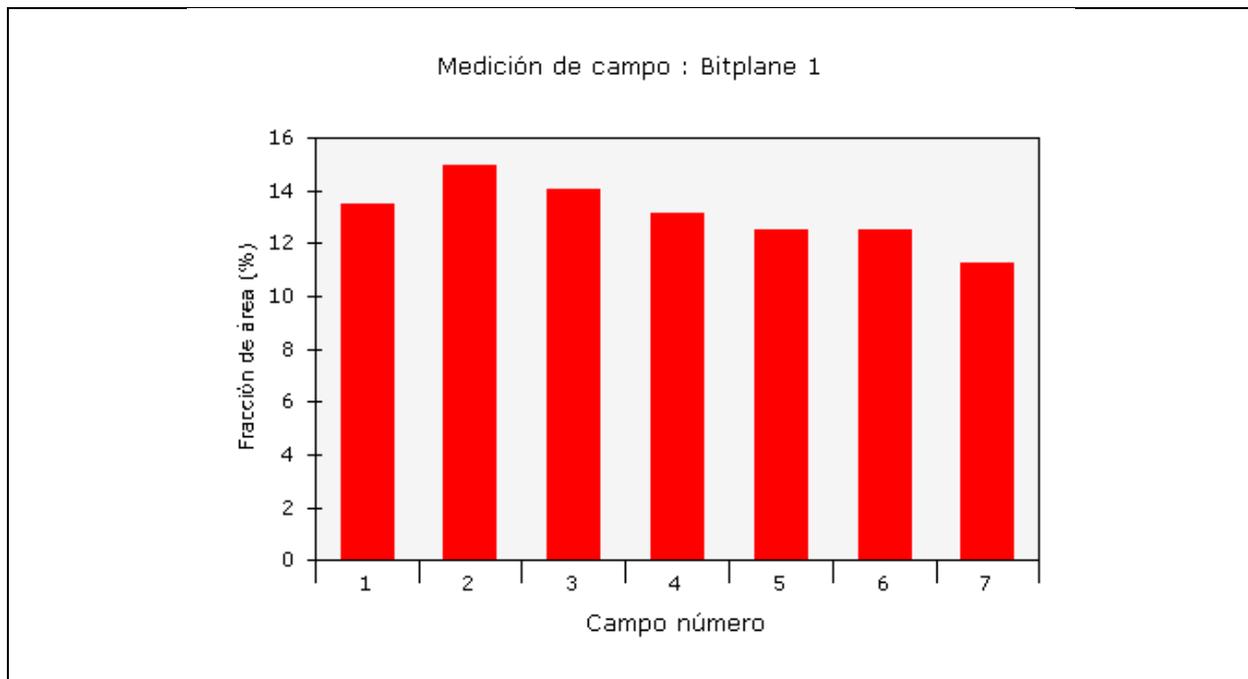
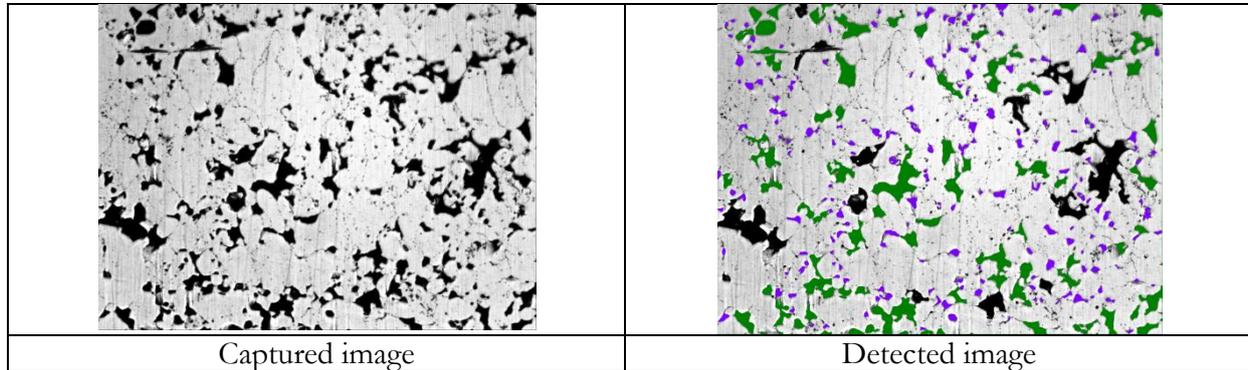
Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-04-18	Magnification:	100x



Measurement name:	Medición por objeto	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	141,5869 μm^2	Std dev:	348,2607 μm^2
Total:	243671,0724 μm^2	95% CI:	322,10 μm^2
Min:	3,0991 μm^2	% RA:	227,49 μm^2
Max:	6516,8437 μm^2	No fields of view:	7
Data points:	1721	Total area analyzed:	1550948,65 μm^2

430L (750 MPa) - Porosidad superficial

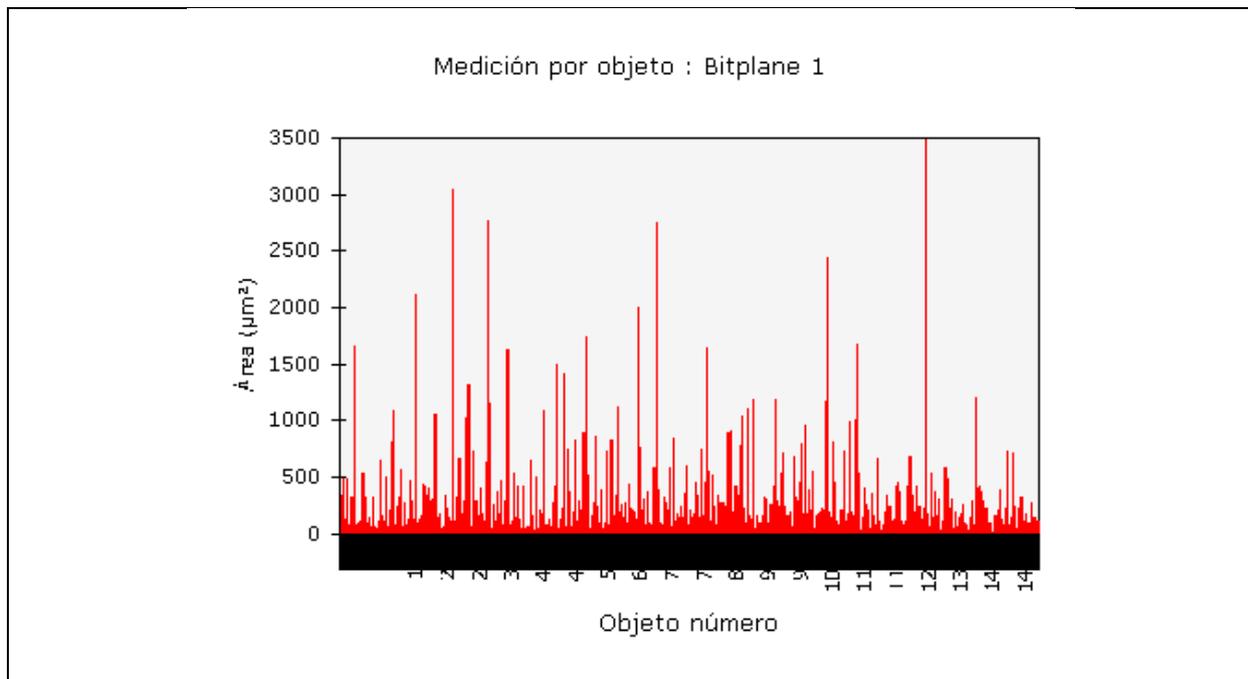
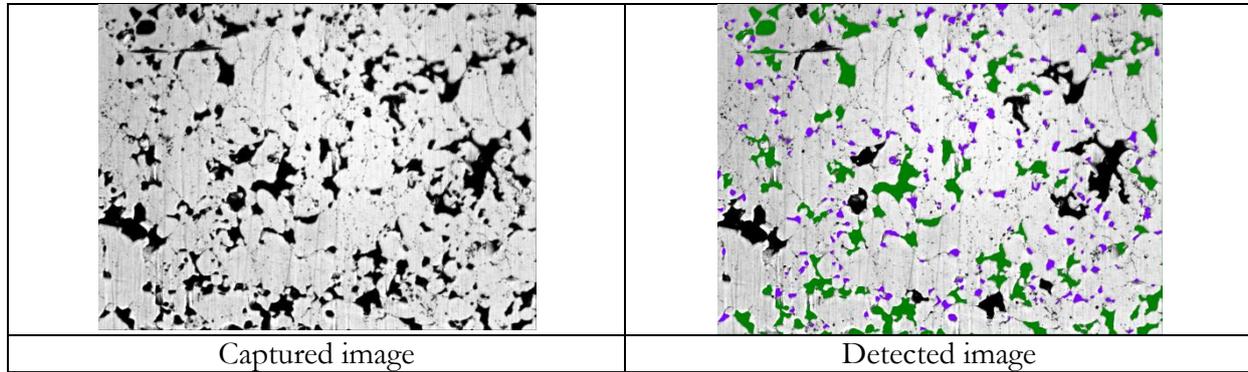
Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-04-04	Magnification:	100x



Measurement name:	Medición de campo	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	13,1191 %	Std dev:	1,0951 %
Total:	91,8337 %	95% CI:	1,01 %
Min:	11,2626 %	% RA:	7,72 %
Max:	14,9095 %	No fields of view:	7
Data points:	7	Total area analyzed:	1550948,65 μm^2

430L (750 MPa) - Área de los poros

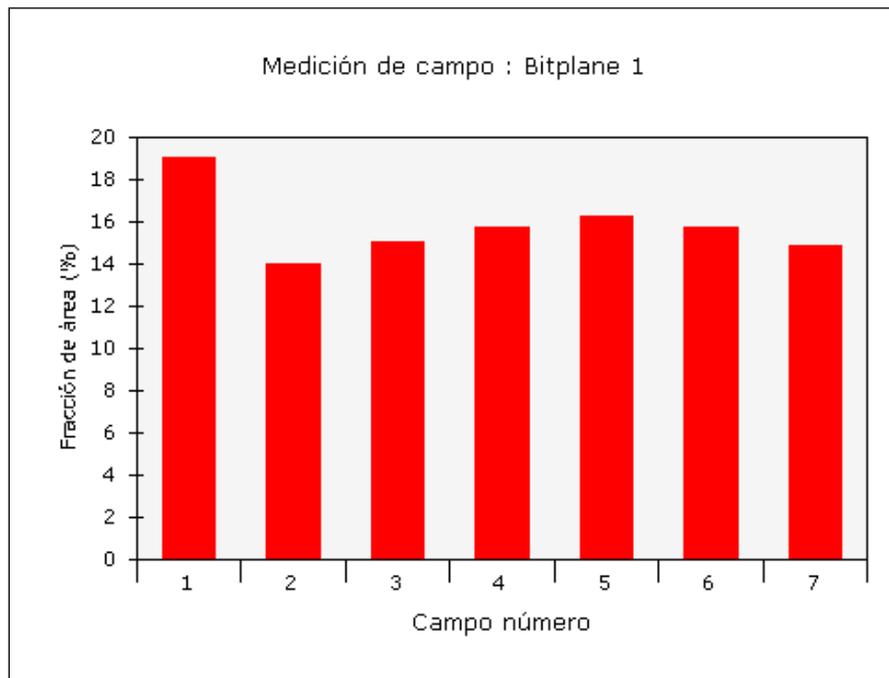
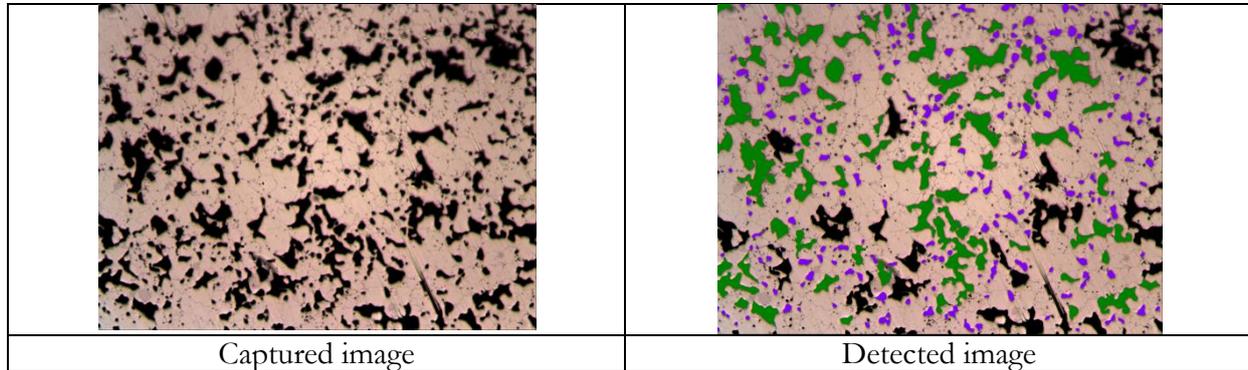
Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-04-04	Magnification:	100x



Measurement name:	Medición por objeto	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	133,2485 μm^2	Std dev:	267,2175 μm^2
Total:	203470,4050 μm^2	95% CI:	247,14 μm^2
Min:	3,3808 μm^2	% RA:	185,48 μm^2
Max:	3483,0690 μm^2	No fields of view:	7
Data points:	1527	Total area analyzed:	1550948,65 μm^2

316L (550 MPa) - Porosidad superficial

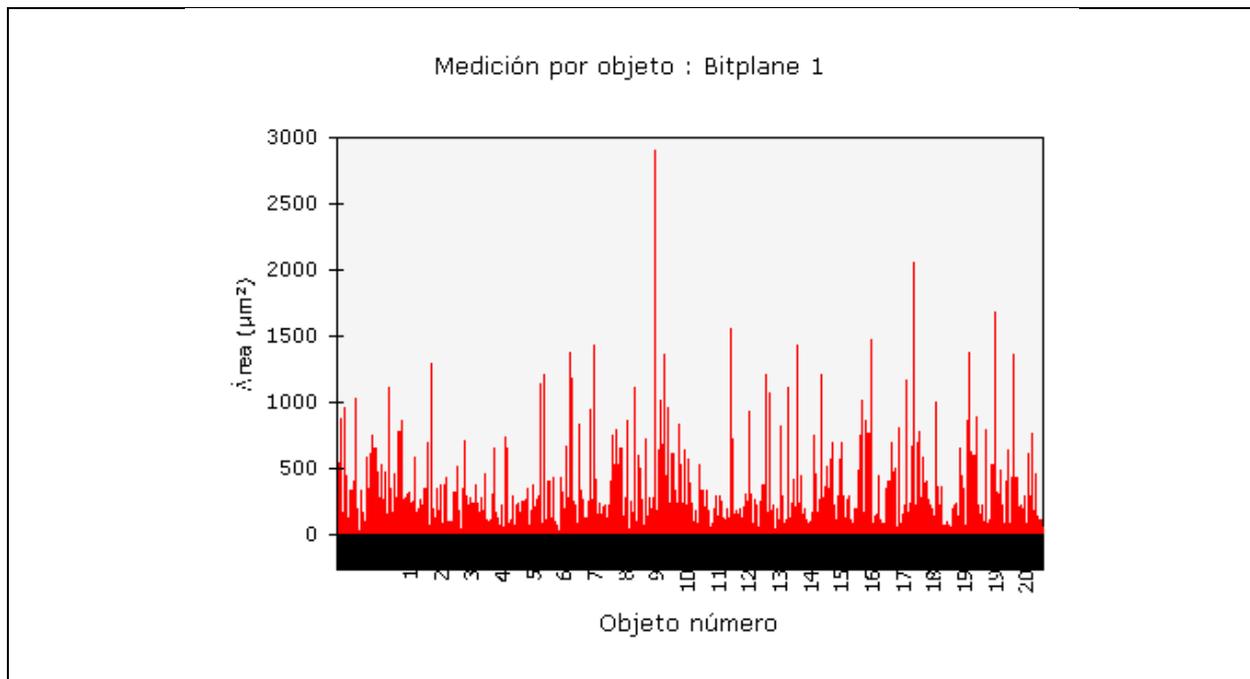
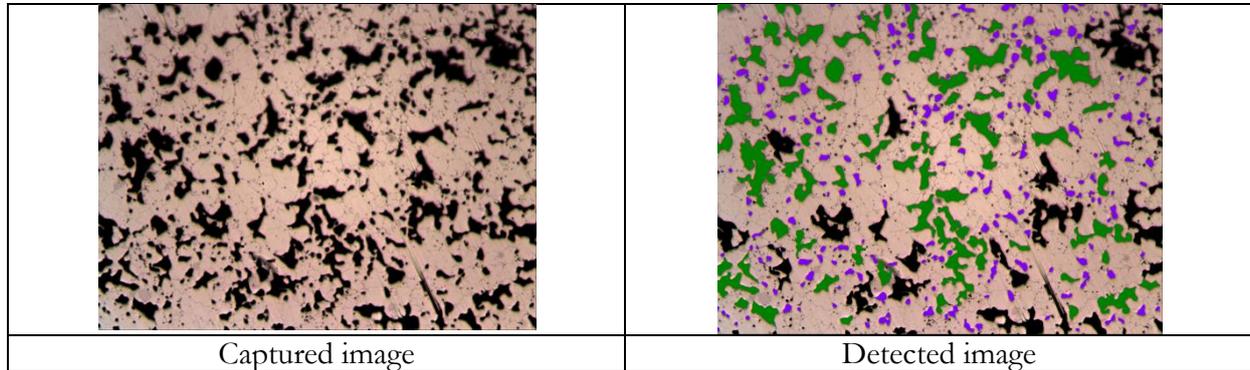
Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-02-27	Magnification:	100x



Measurement name:	Medición de campo	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	15,7993 %	Std dev:	1,4696 %
Total:	110,5952 %	95% CI:	1,36 %
Min:	14,0042 %	% RA:	8,60 %
Max:	18,9919 %	No fields of view:	7
Data points:	7	Total area analyzed:	1550948,65 μm^2

316L (550 MPa) - Área de los poros

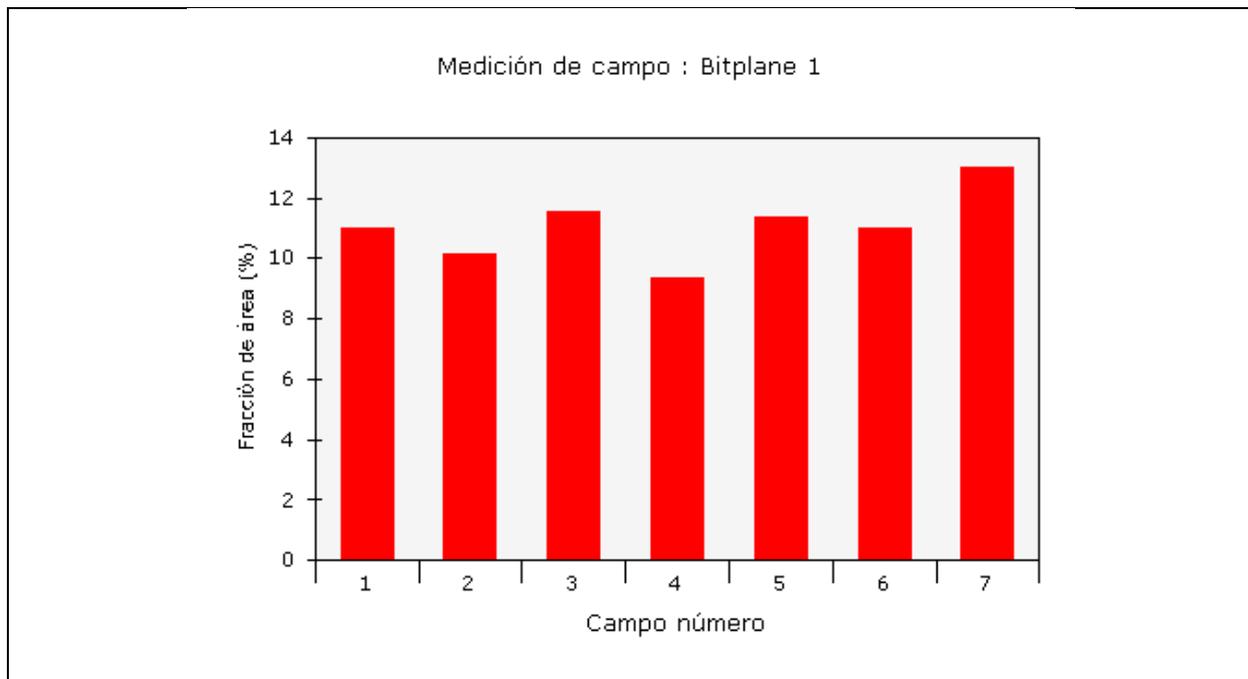
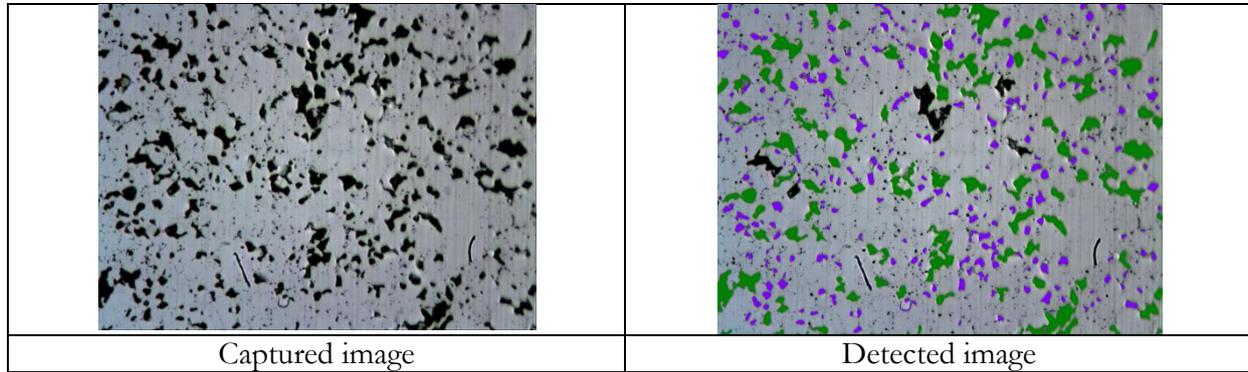
Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-02-27	Magnification:	100x



Measurement name:	Medición por objeto	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	112,5065 μm^2	Std dev:	200,6269 μm^2
Total:	245039,2398 μm^2	95% CI:	185,56 μm^2
Min:	3,7330 μm^2	% RA:	164,93 μm^2
Max:	2904,6705 μm^2	No fields of view:	7
Data points:	2178	Total area analyzed:	1550948,65 μm^2

316L (750 MPa) - Porosidad superficial

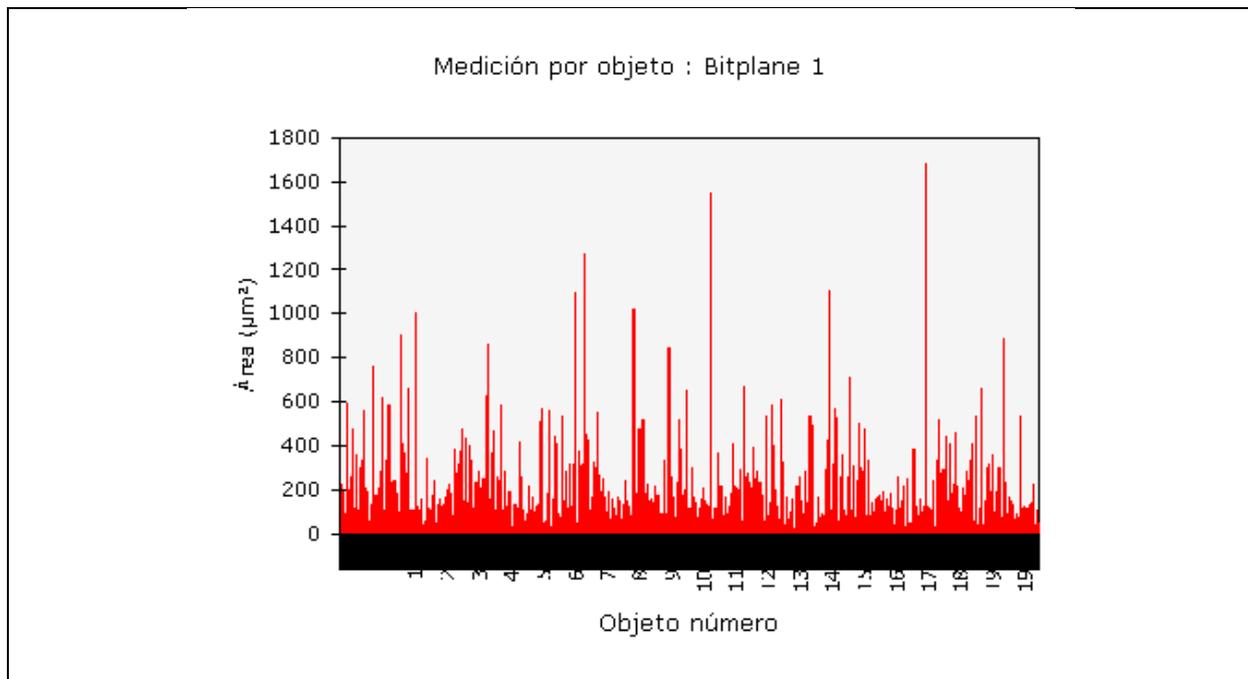
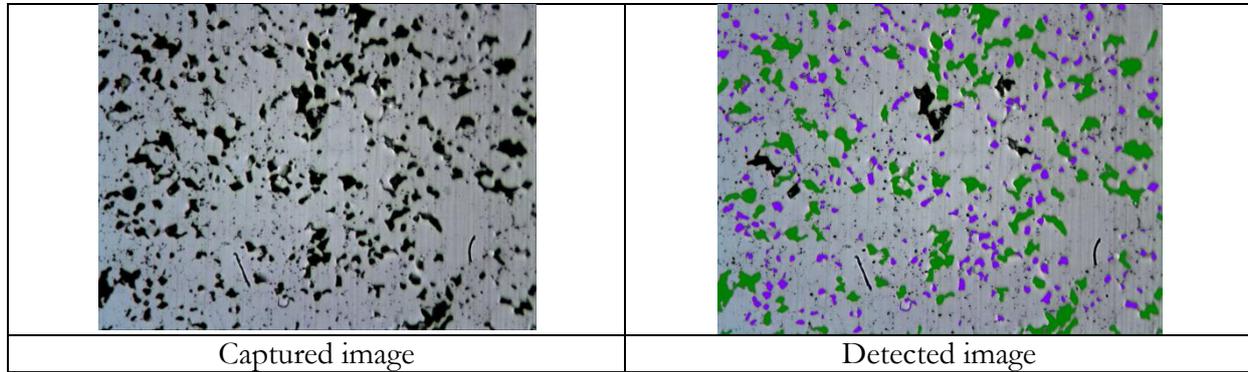
Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-03-27	Magnification:	100x



Measurement name:	Medición de campo	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	11,0682 %	Std dev:	1,0728 %
Total:	77,4776 %	95% CI:	0,99 %
Min:	9,3514 %	% RA:	8,96 %
Max:	13,0440 %	No fields of view:	7
Data points:	7	Total area analyzed:	1550948,65 μm^2

316L (750 MPa) - Área de los poros

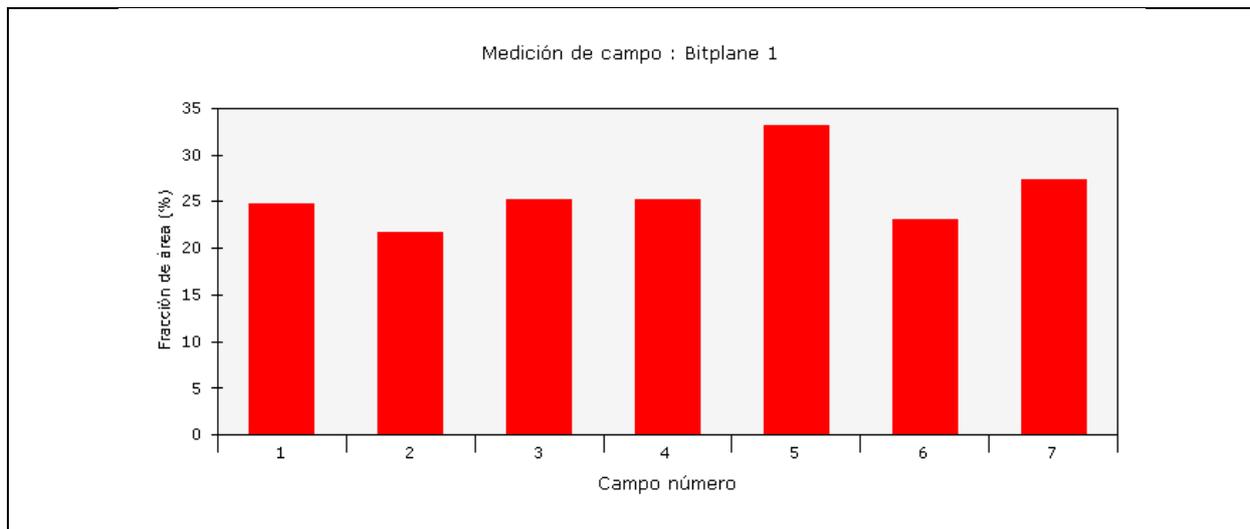
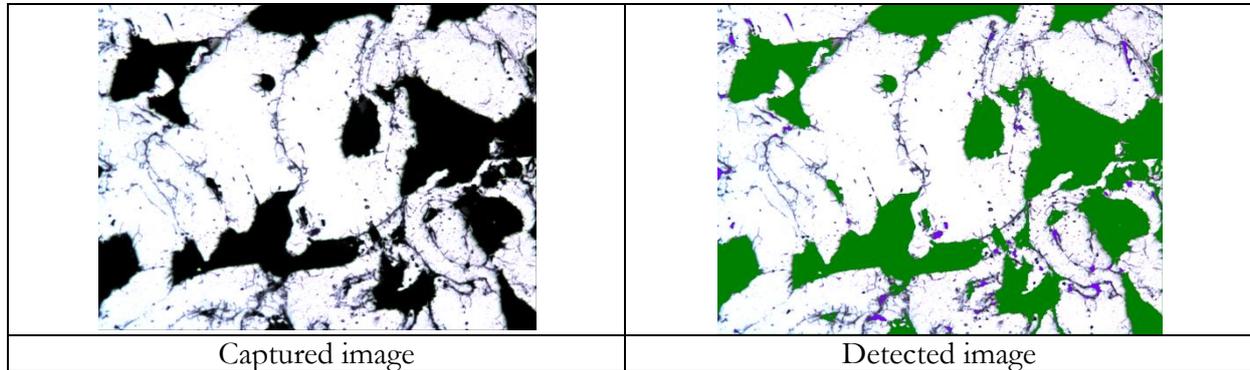
Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-03-27	Magnification:	100x



Measurement name:	Medición por objeto	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	82,8888 μm^2	Std dev:	130,5613 μm^2
Total:	171662,6435 μm^2	95% CI:	120,75 μm^2
Min:	3,8738 μm^2	% RA:	145,68 μm^2
Max:	1684,6948 μm^2	No fields of view:	7
Data points:	2071	Total area analyzed:	1550948,65 μm^2

316L [300-500 μm] (550 MPa) - Porosidad superficial

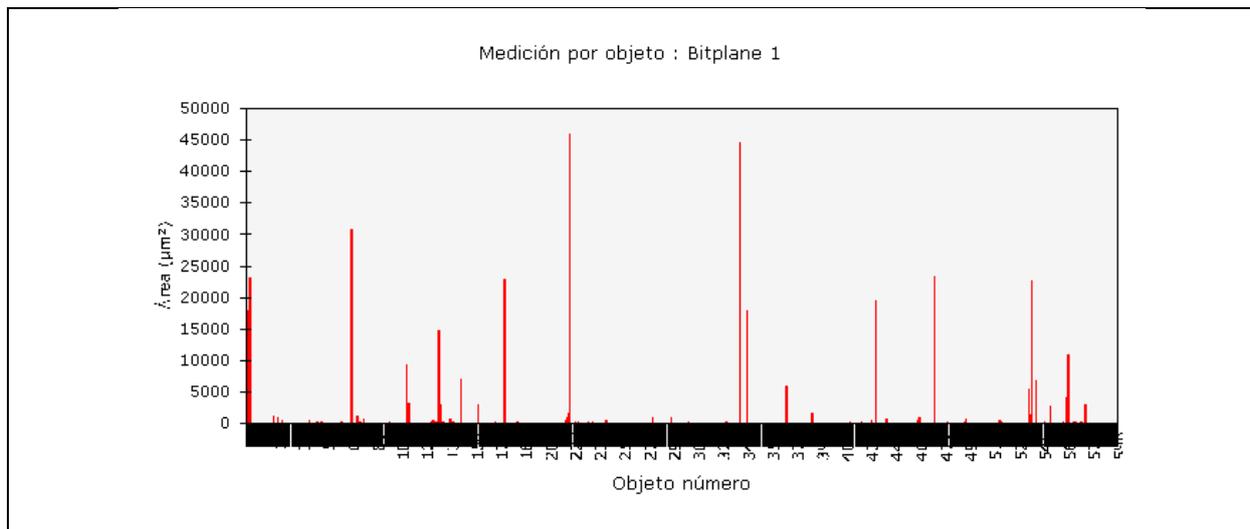
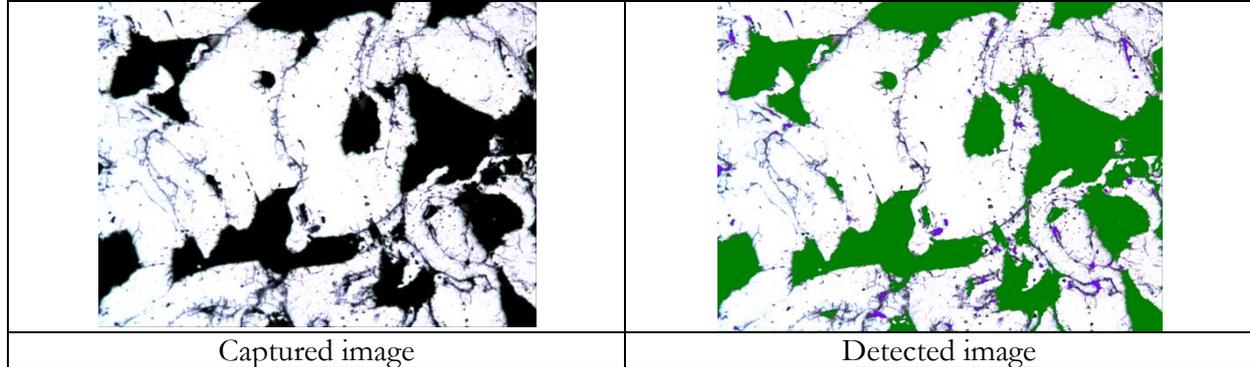
Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 μm/pixel
Date:	2012-05-30	Magnification:	100x



Measurement name:	Medición de campo	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	25,7550 %	Std dev:	3,4073 %
Total:	180,2848 %	95% CI:	3,15 %
Min:	21,6827 %	% RA:	12,24 %
Max:	33,0750 %	No fields of view:	7
Data points:	7	Total area analyzed:	1550948,65 μm ²

316L [300-500 μm] (550 MPa) - Área de los poros

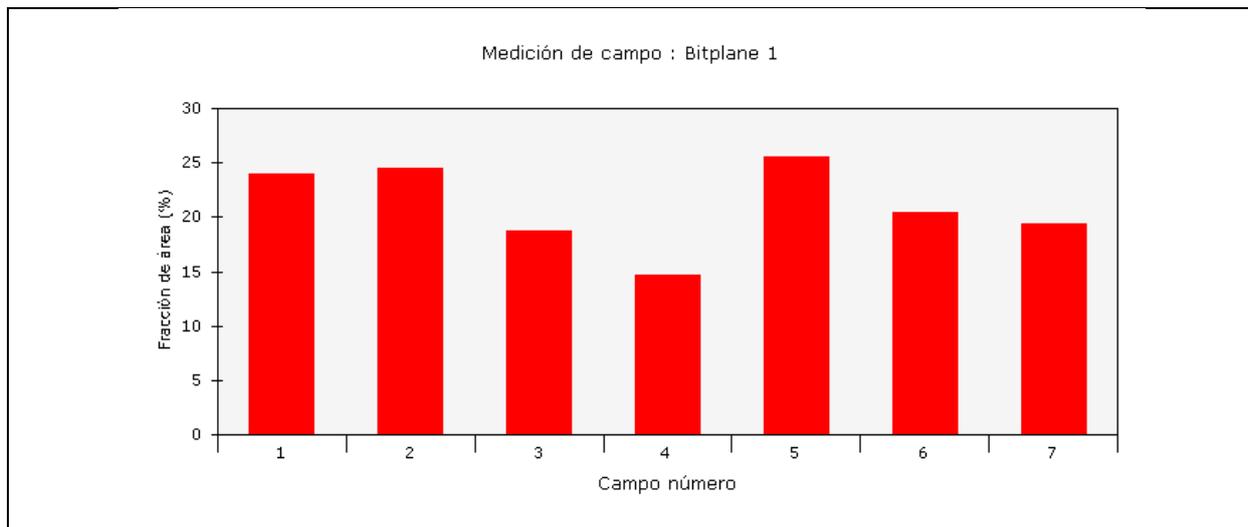
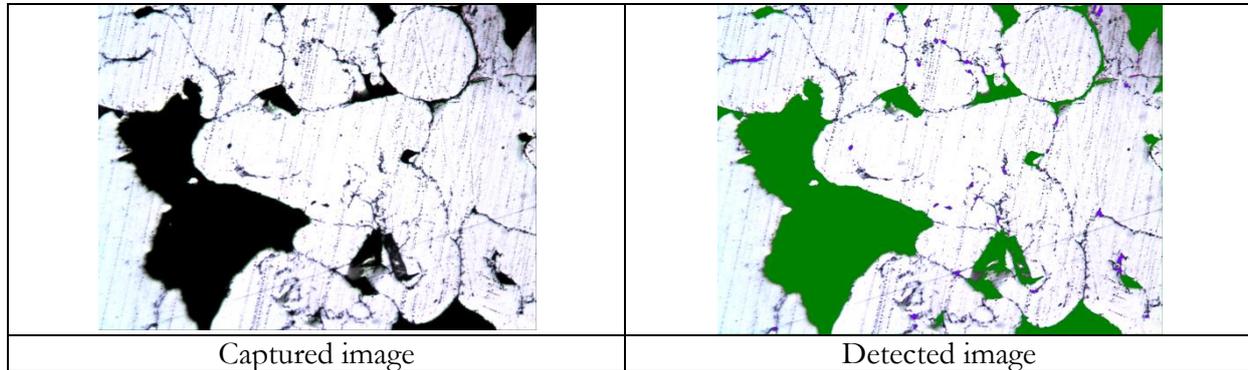
Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-05-30	Magnification:	100x



Measurement name:	Medición por objeto	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	665,7440 μm^2	Std dev:	3795,8688 μm^2
Total:	399446,4222 μm^2	95% CI:	3510,72 μm^2
Min:	3,8034 μm^2	% RA:	527,34 μm^2
Max:	46002,0493 μm^2	No fields of view:	7
Data points:	600	Total area analyzed:	1550948,65 μm^2

316L [300-500 μm] (750 MPa) - Porosidad superficial

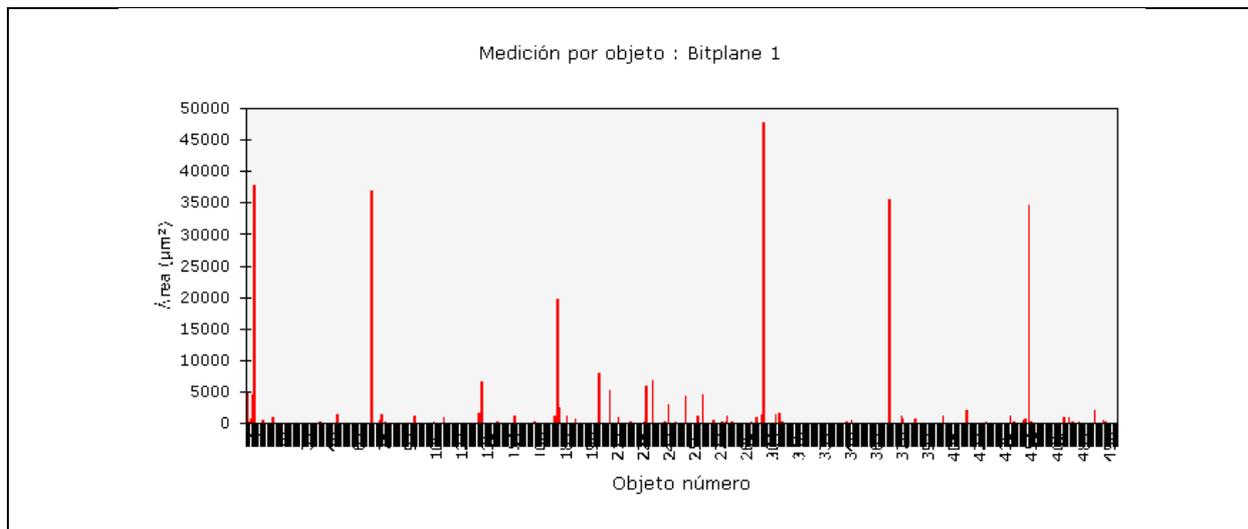
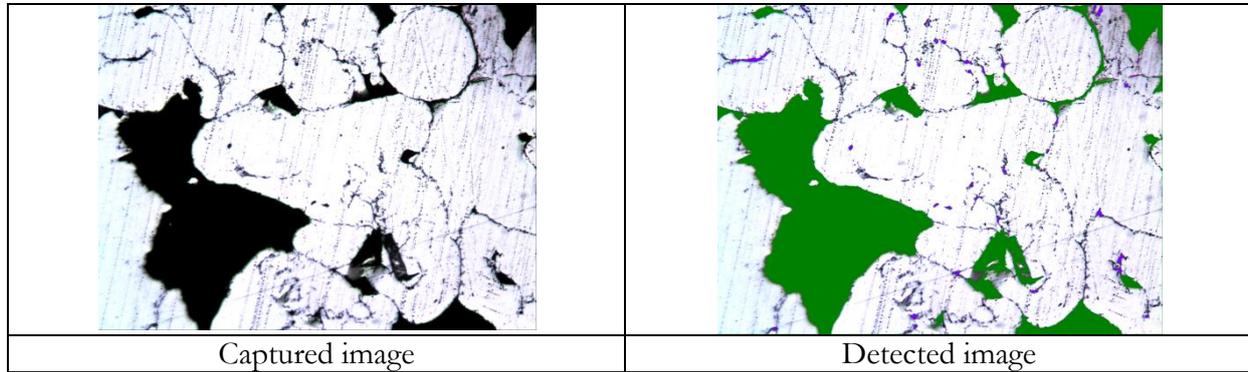
Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-05-30	Magnification:	100x



Measurement name:	Medición de campo	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	21,0112 %	Std dev:	3,5839 %
Total:	147,0783 %	95% CI:	3,31 %
Min:	14,6389 %	% RA:	15,78 %
Max:	25,4891 %	No fields of view:	7
Data points:	7	Total area analyzed:	1550948,65 μm^2

316L [300-500 μm] (750 MPa) - Área de los poros

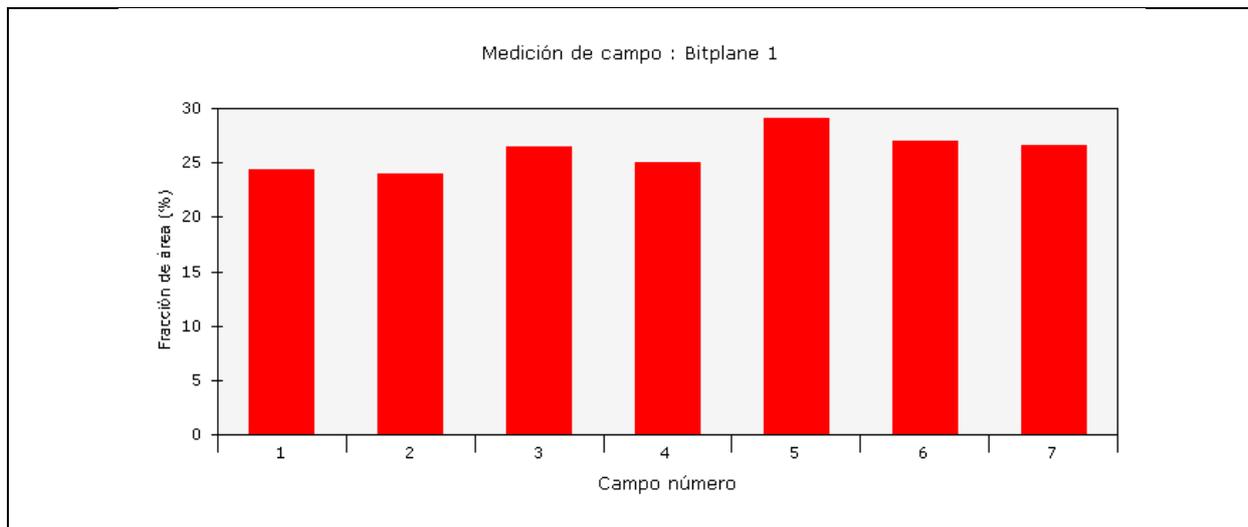
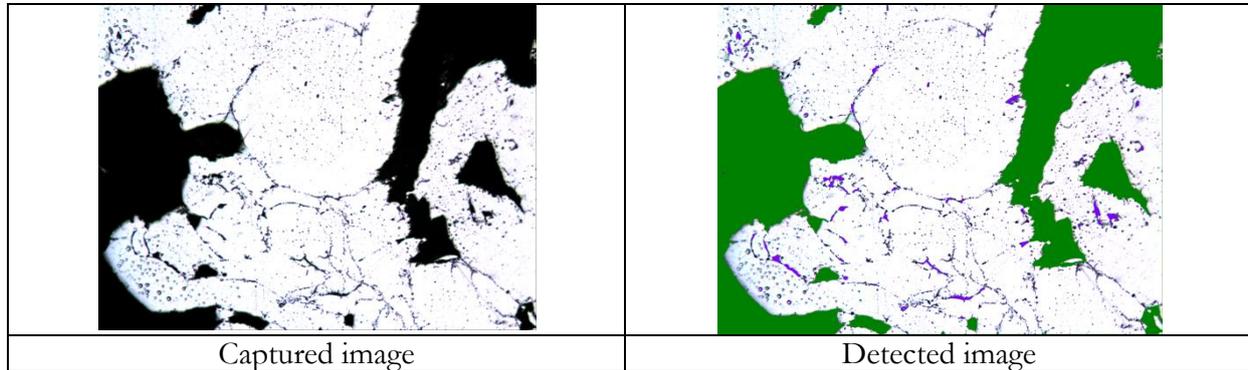
Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 μm/pixel
Date:	2012-05-30	Magnification:	100x



Measurement name:	Medición por objeto	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	645,2924 μm ²	Std dev:	3996,9894 μm ²
Total:	325872,6830 μm ²	95% CI:	3696,73 μm ²
Min:	3,7330 μm ²	% RA:	572,88 μm ²
Max:	47734,5683 μm ²	No fields of view:	7
Data points:	505	Total area analyzed:	1550948,65 μm ²

316L [500-710 μm] (550 MPa) - Porosidad superficial

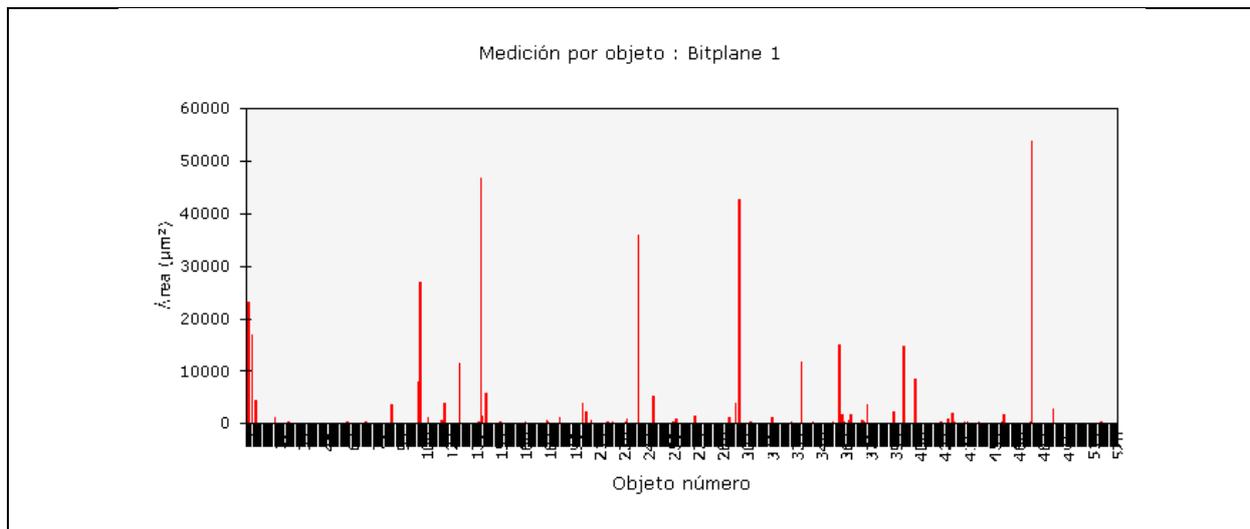
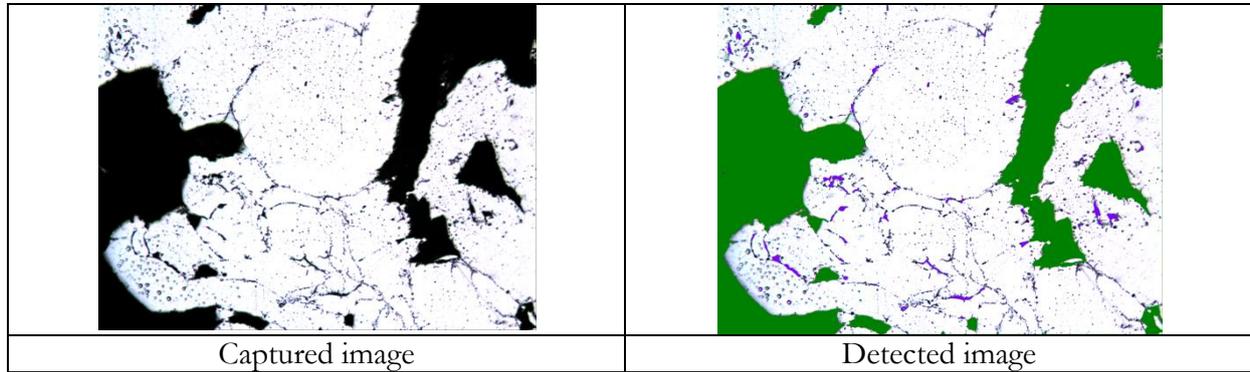
Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-05-30	Magnification:	100x



Measurement name:	Medición de campo	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	26,0302 %	Std dev:	1,6380 %
Total:	182,2112 %	95% CI:	1,51 %
Min:	23,9162 %	% RA:	5,82 %
Max:	29,0140 %	No fields of view:	7
Data points:	7	Total area analyzed:	1550948,65 μm^2

316L [500-710 μm] (550 MPa) - Área de los poros

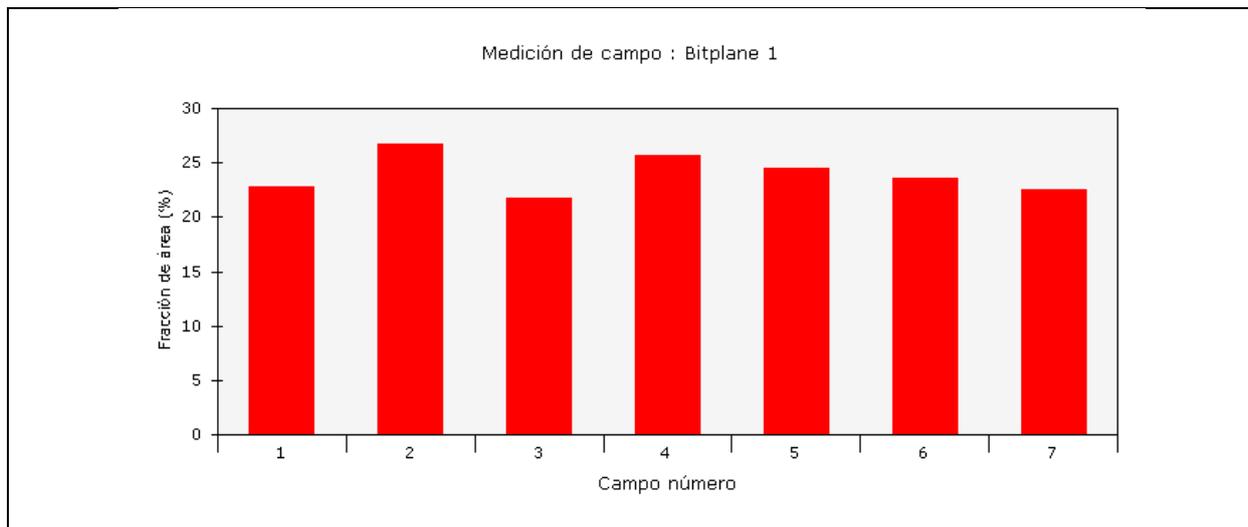
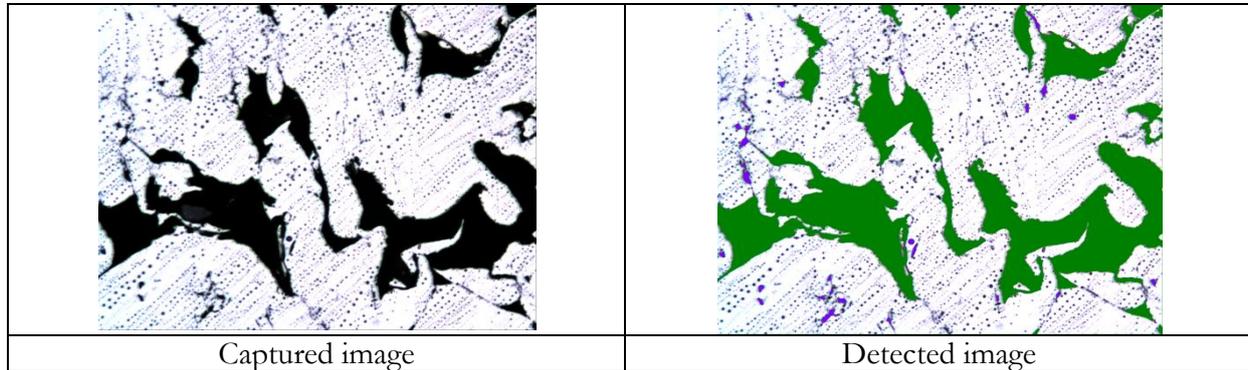
Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-05-30	Magnification:	100x



Measurement name:	Medición por objeto	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	761,7255 μm^2	Std dev:	4445,1190 μm^2
Total:	403714,5410 μm^2	95% CI:	4111,20 μm^2
Min:	2,3243 μm^2	% RA:	539,72 μm^2
Max:	53763,7317 μm^2	No fields of view:	7
Data points:	530	Total area analyzed:	1550948,65 μm^2

316L [500-710 μm] (750 MPa) - Porosidad superficial

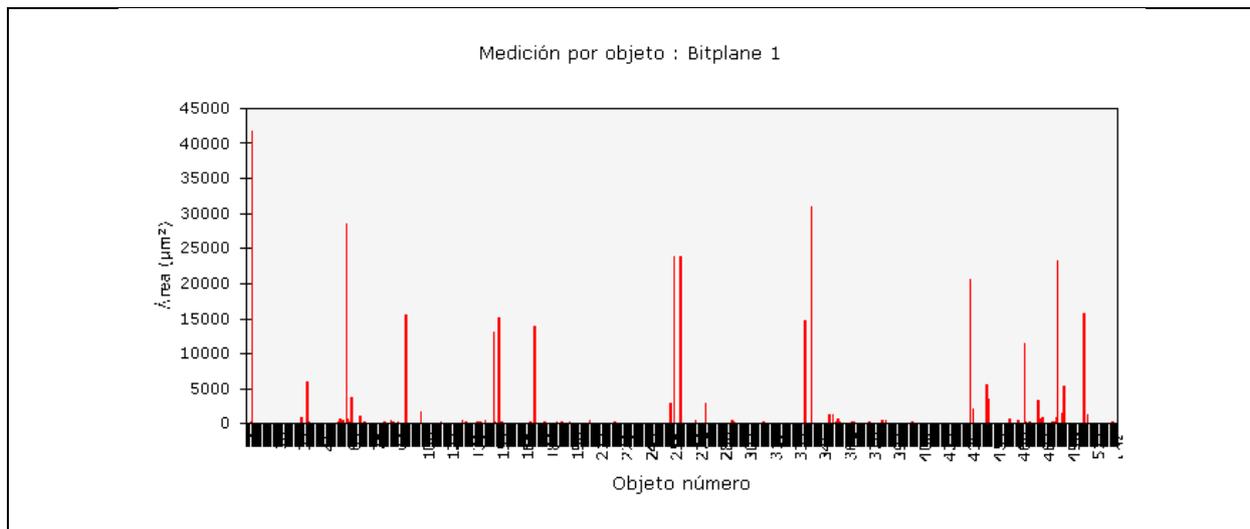
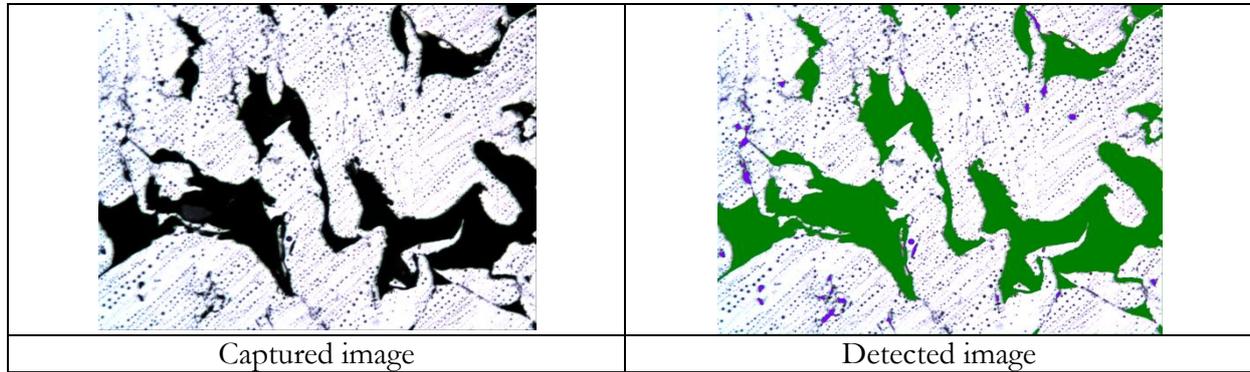
Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-05-30	Magnification:	100x



Measurement name:	Medición de campo	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	23,9067 %	Std dev:	1,6536 %
Total:	167,3472 %	95% CI:	1,53 %
Min:	21,7673 %	% RA:	6,40 %
Max:	26,6616 %	No fields of view:	7
Data points:	7	Total area analyzed:	1550948,65 μm^2

316L [500-710 μm] (750 MPa) - Área de los poros

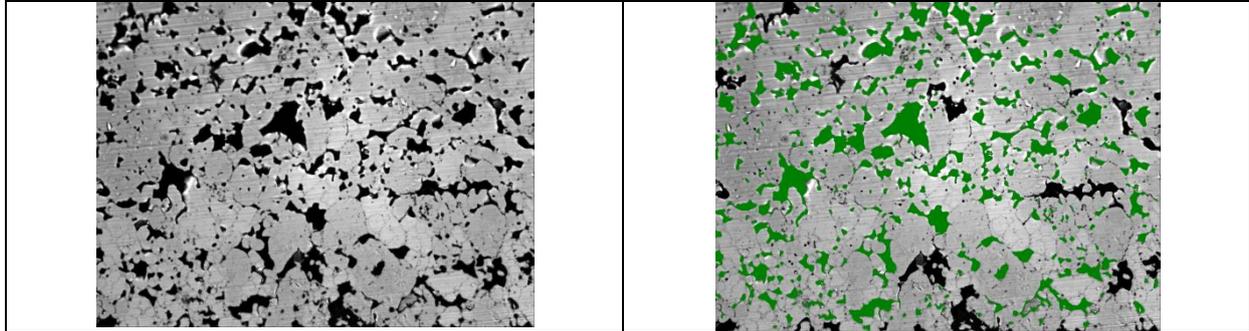
Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-05-30	Magnification:	100x



Measurement name:	Medición por objeto	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	703,5697 μm^2	Std dev:	3632,1609 μm^2
Total:	370781,2549 μm^2	95% CI:	3359,31 μm^2
Min:	5,2825 μm^2	% RA:	477,47 μm^2
Max:	41761,8925 μm^2	No fields of view:	7
Data points:	527	Total area analyzed:	1550948,65 μm^2

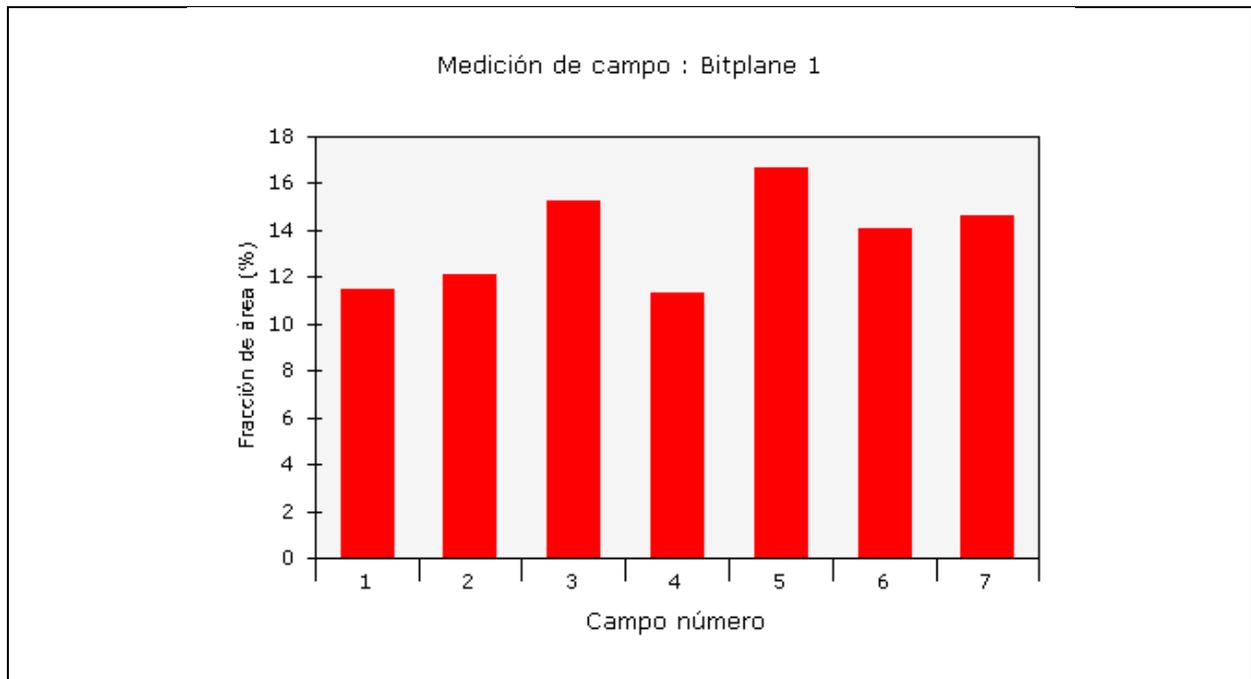
Dúplex 50/50 (550 MPa) - Porosidad superficial

Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-04-03	Magnification:	100x



Captured image

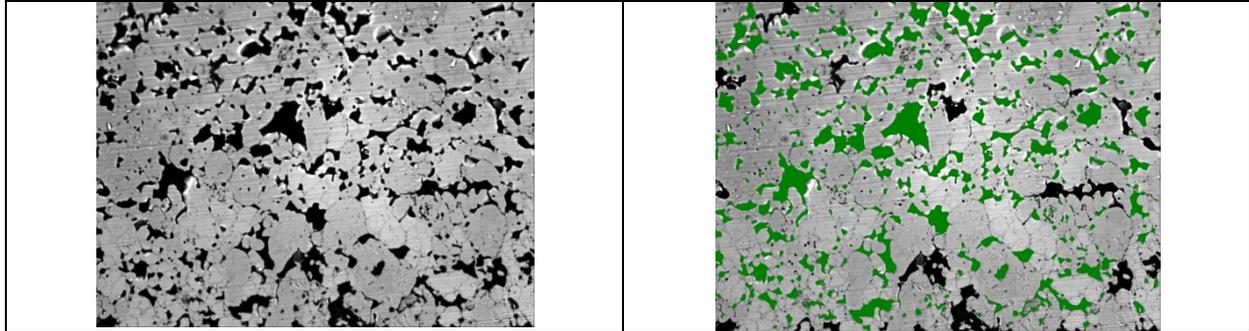
Detected image



Measurement name:	Medición de campo	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	13,6402 %	Std dev:	1,9059 %
Total:	95,4814 %	95% CI:	1,76 %
Min:	11,3096 %	% RA:	12,92 %
Max:	16,6649 %	No fields of view:	7
Data points:	7	Total area analyzed:	1550948,65 μm^2

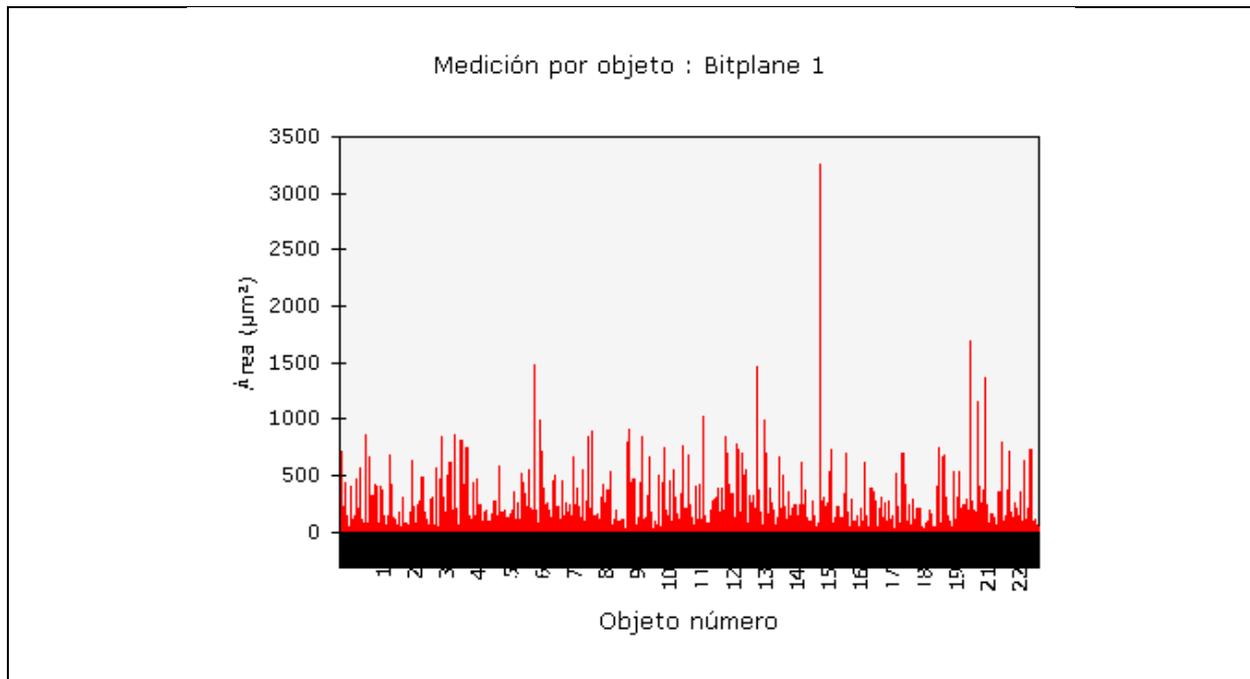
Dúplex 50/50 (550 MPa) - Área de los poros

Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-04-03	Magnification:	100x



Captured image

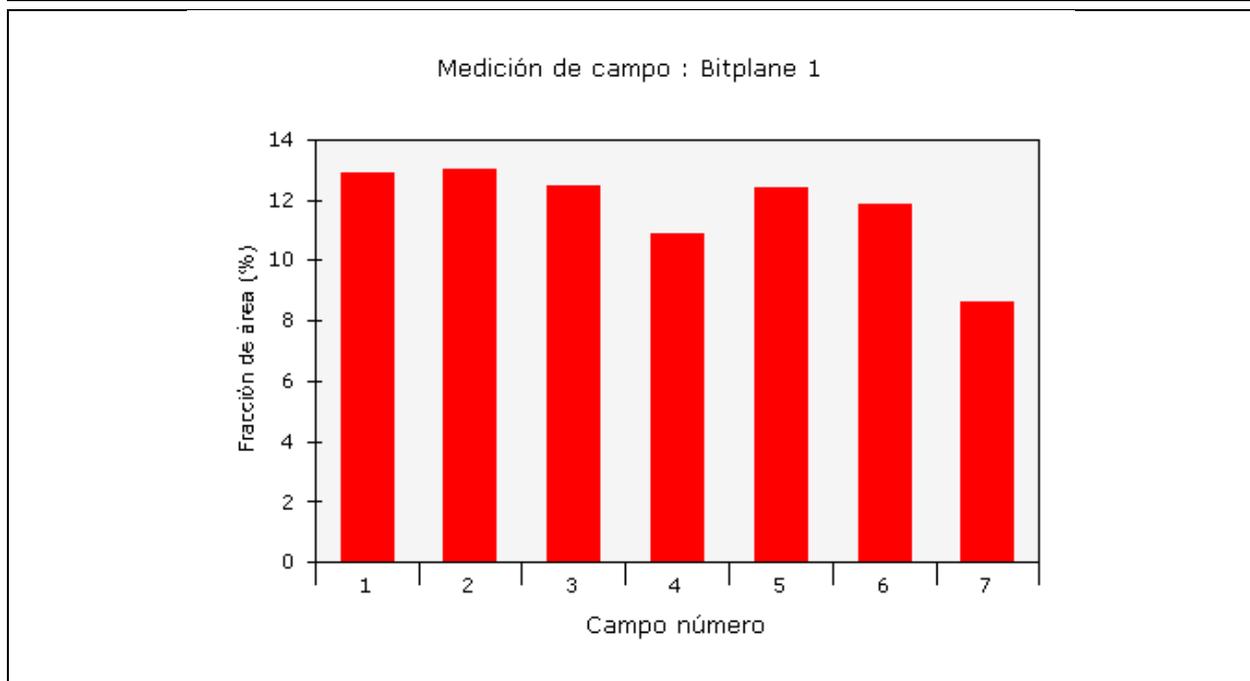
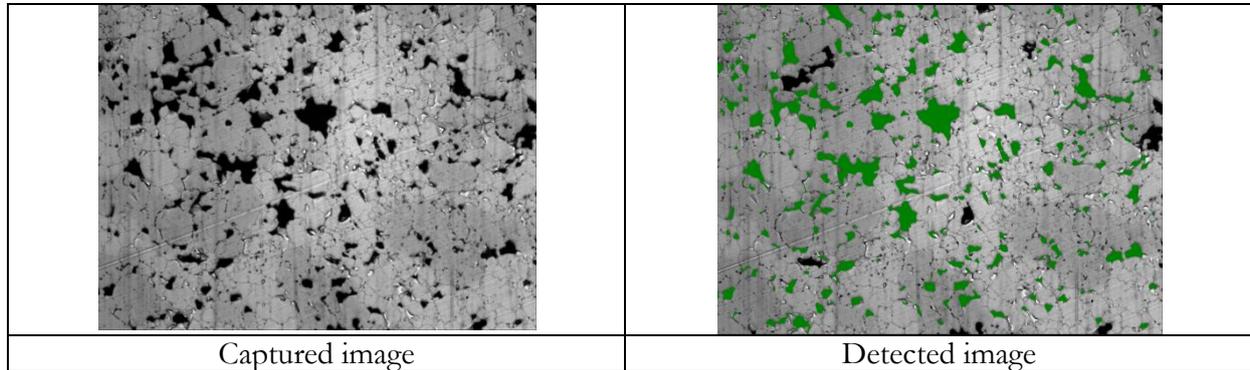
Detected image



Measurement name:	Medición por objeto	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	91,7003 μm^2	Std dev:	162,2177 μm^2
Total:	211552,5590 μm^2	95% CI:	150,03 μm^2
Min:	3,3104 μm^2	% RA:	163,61 μm^2
Max:	3245,7791 μm^2	No fields of view:	7
Data points:	2307	Total area analyzed:	1550948,65 μm^2

Dúplex 50/50 (750 MPa) - Porosidad superficial

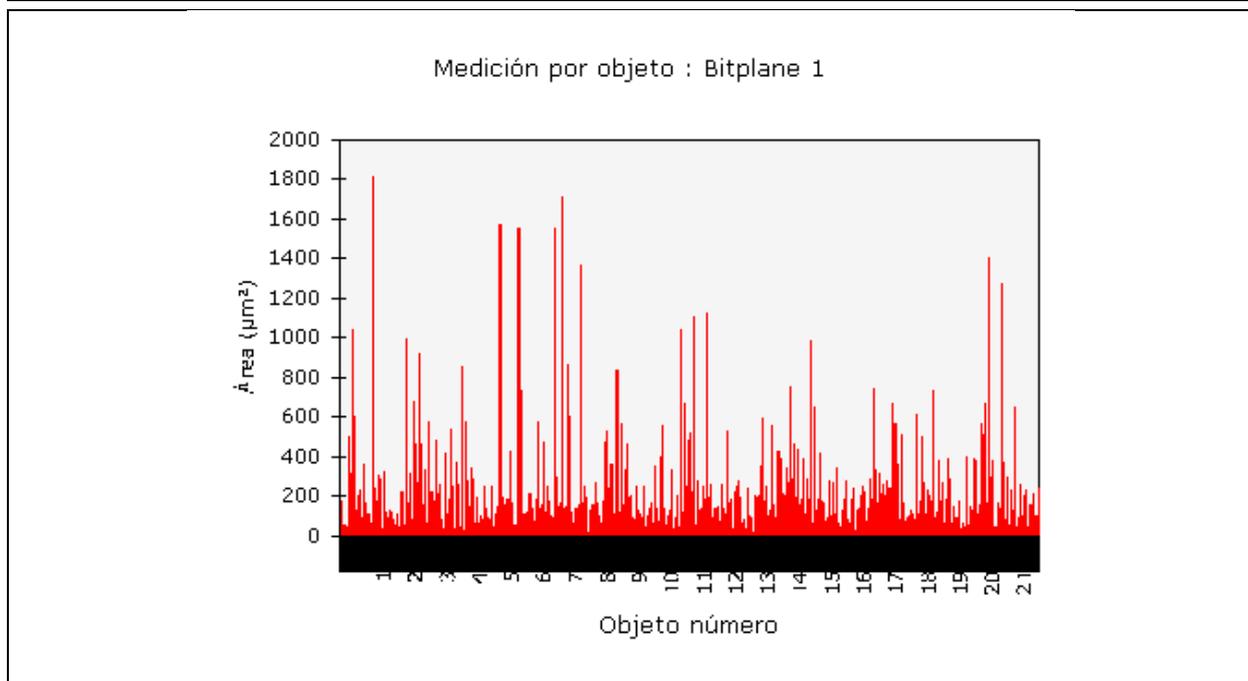
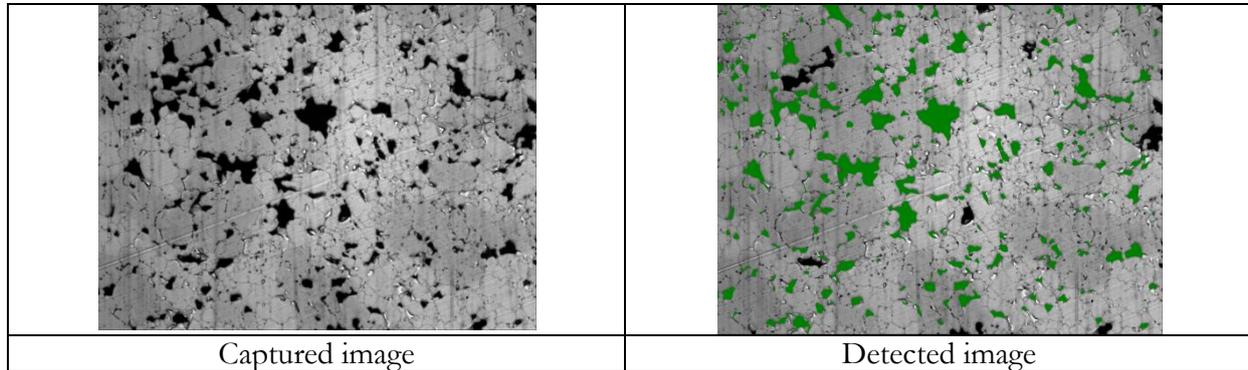
Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-04-02	Magnification:	100x



Measurement name:	Medición de campo	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	11,7425 %	Std dev:	1,4437 %
Total:	82,1972 %	95% CI:	1,34 %
Min:	8,6006 %	% RA:	11,37 %
Max:	13,0308 %	No fields of view:	7
Data points:	7	Total area analyzed:	1550948,65 μm^2

Dúplex 50/50 (750 MPa) - Área de los poros

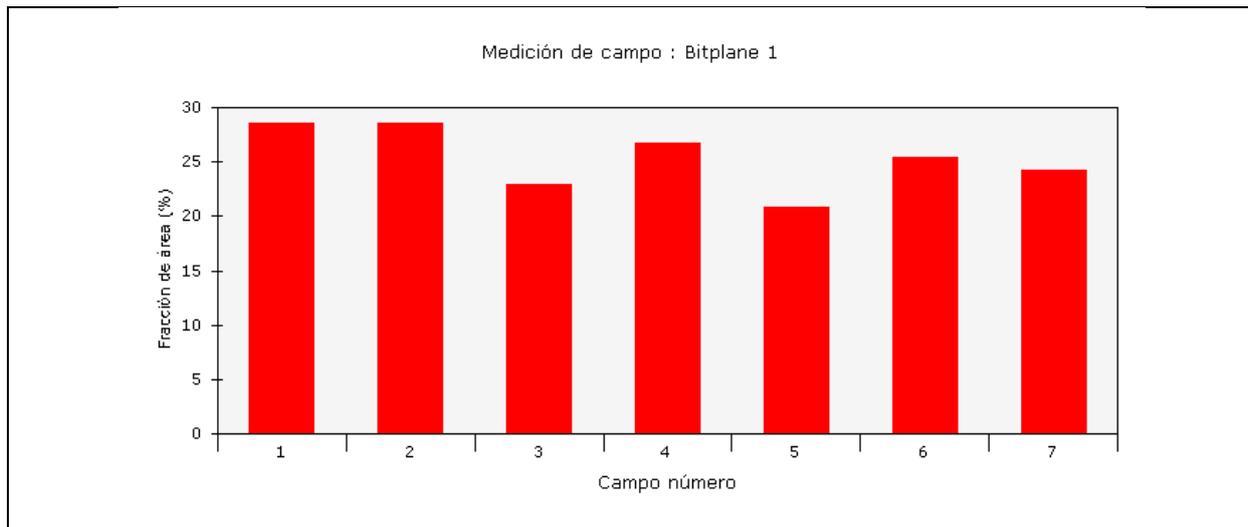
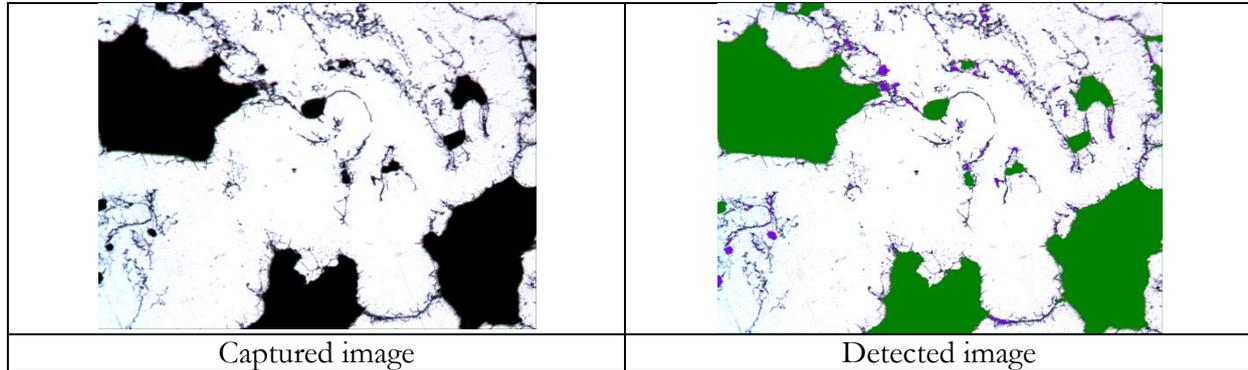
Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-04-02	Magnification:	100x



Measurement name:	Medición por objeto	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	80,2288 μm^2	Std dev:	146,6649 μm^2
Total:	182119,3867 μm^2	95% CI:	135,65 μm^2
Min:	4,0147 μm^2	% RA:	169,08 μm^2
Max:	1808,9392 μm^2	No fields of view:	7
Data points:	2270	Total area analyzed:	1550948,65 μm^2

Mezcla austenítica (550 MPa) - Porosidad superficial

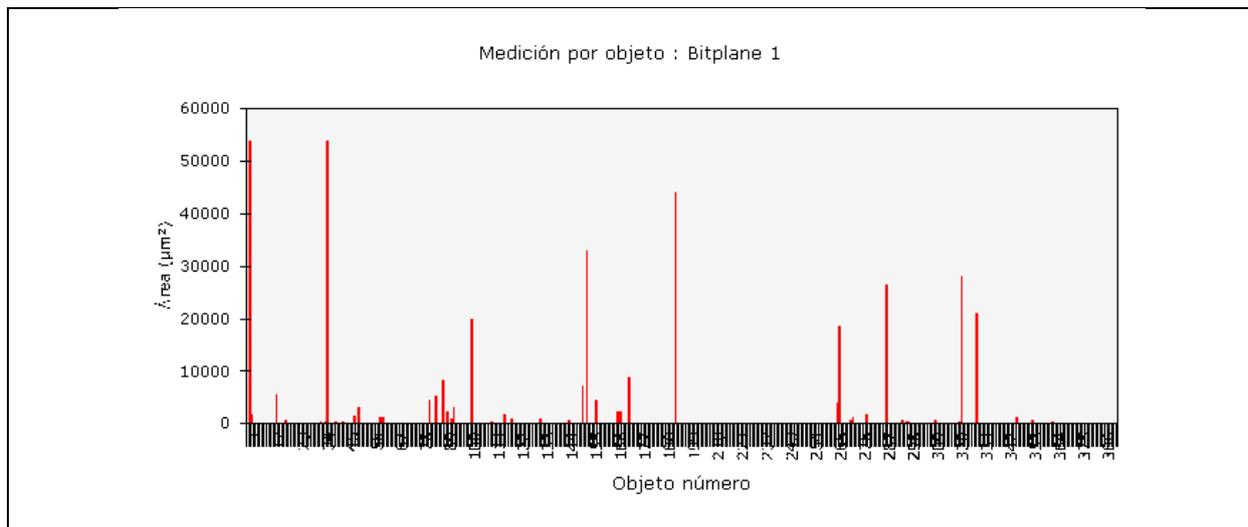
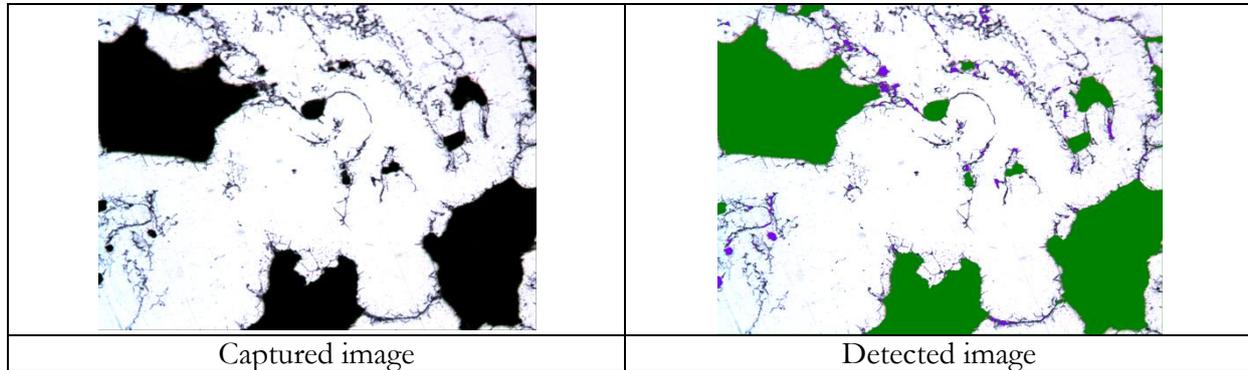
Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-05-30	Magnification:	100x



Measurement name:	Medición de campo	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	25,3261 %	Std dev:	2,7024 %
Total:	177,2828 %	95% CI:	2,50 %
Min:	20,7655 %	% RA:	9,87 %
Max:	28,5854 %	No fields of view:	7
Data points:	7	Total area analyzed:	1550948,65 μm^2

Mezcla austenítica (550 MPa) - Área de los poros

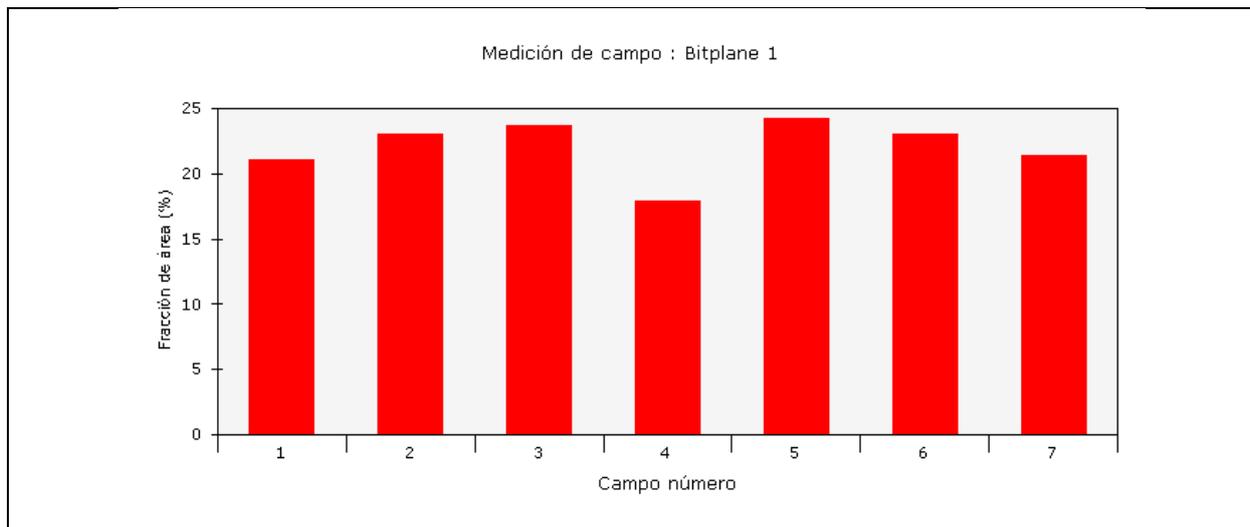
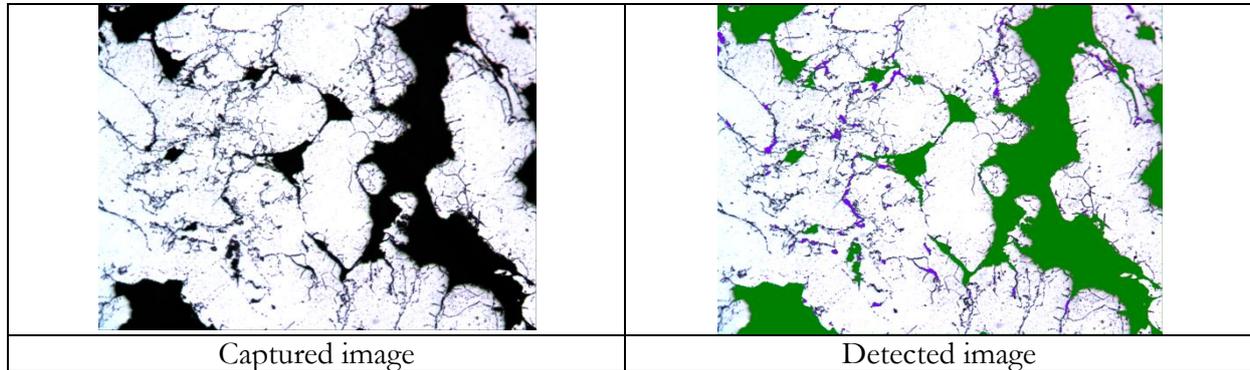
Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-05-30	Magnification:	100x



Measurement name:	Medición por objeto	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	999,4787 μm^2	Std dev:	5386,0575 μm^2
Total:	392795,1213 μm^2	95% CI:	4981,45 μm^2
Min:	3,3808 μm^2	% RA:	498,41 μm^2
Max:	53689,5654 μm^2	No fields of view:	7
Data points:	393	Total area analyzed:	1550948,65 μm^2

Mezcla austenítica (750 MPa) - Porosidad superficial

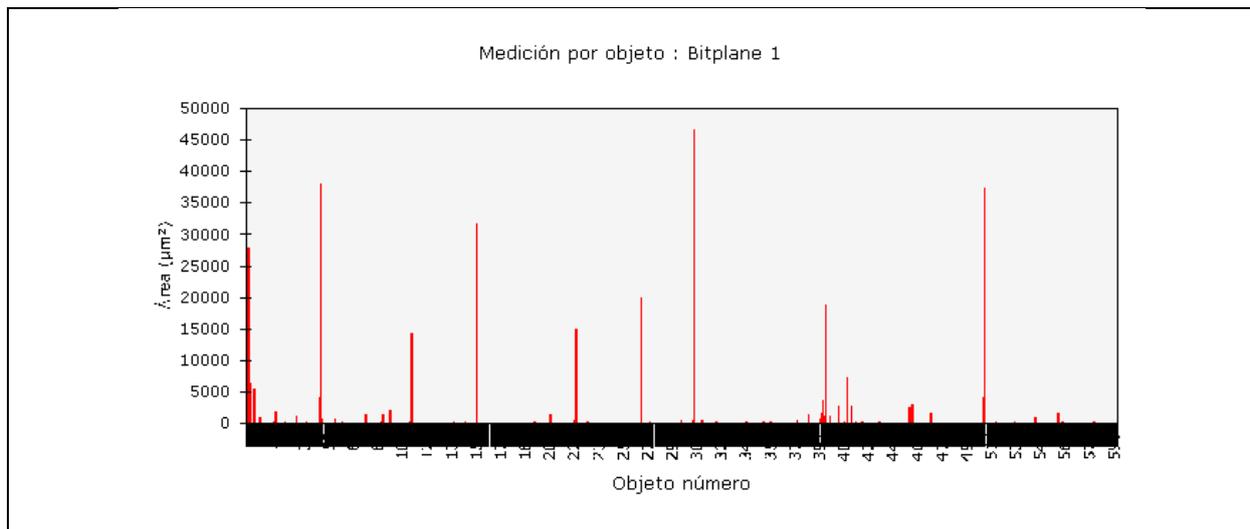
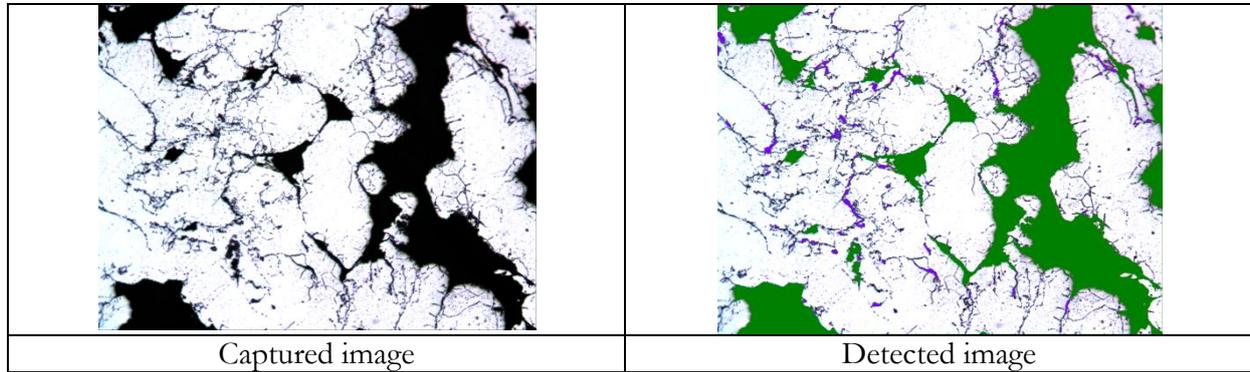
Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-05-30	Magnification:	100x



Measurement name:	Medición de campo	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	22,0547 %	Std dev:	1,9934 %
Total:	154,3829 %	95% CI:	1,84 %
Min:	17,9531 %	% RA:	8,36 %
Max:	24,2633 %	No fields of view:	7
Data points:	7	Total area analyzed:	1550948,65 μm^2

Mezcla austenítica (750 MPa) - Área de los poros

Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-05-30	Magnification:	100x

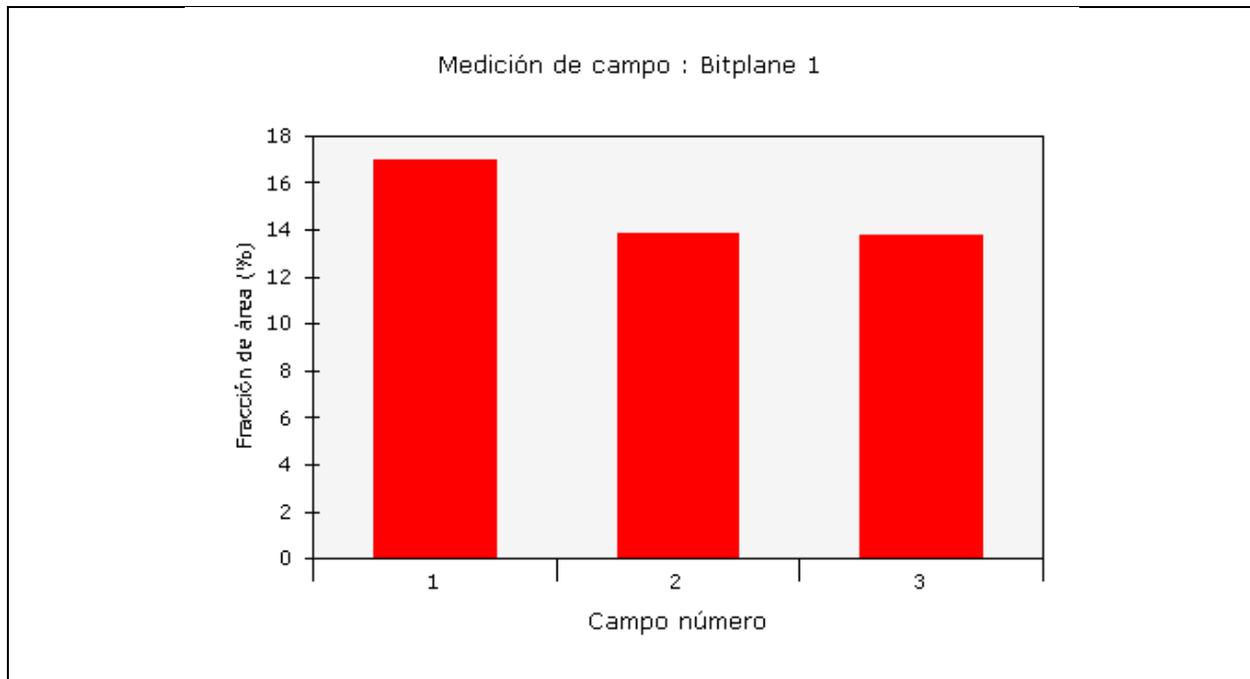
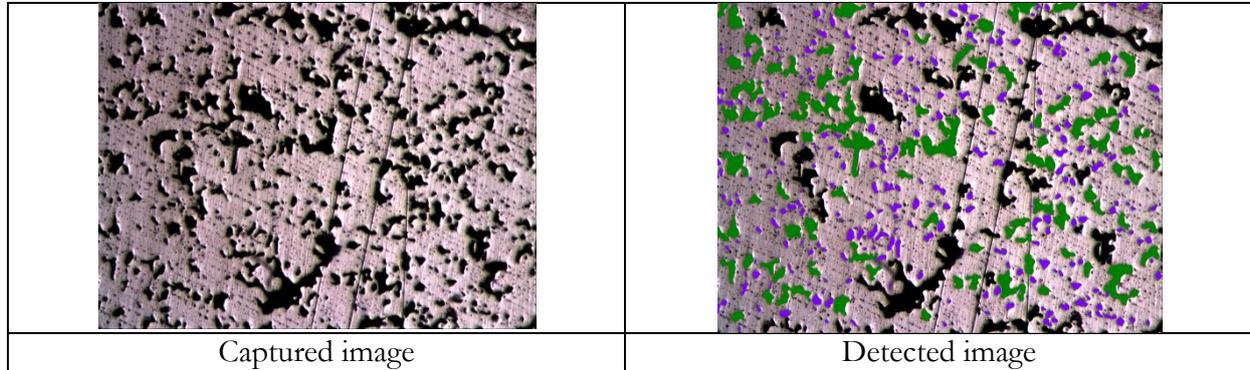


Measurement name:	Medición por objeto	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	566,3196 μm^2	Std dev:	3639,6456 μm^2
Total:	342057,0645 μm^2	95% CI:	3366,23 μm^2
Min:	4,5782 μm^2	% RA:	594,40 μm^2
Max:	46607,7760 μm^2	No fields of view:	7
Data points:	604	Total area analyzed:	1550948,65 μm^2

Bicapa 316L [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa)

Capa 316L [$\frac{2}{3}$] - Porosidad superficial

Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-03-02	Magnification:	100x

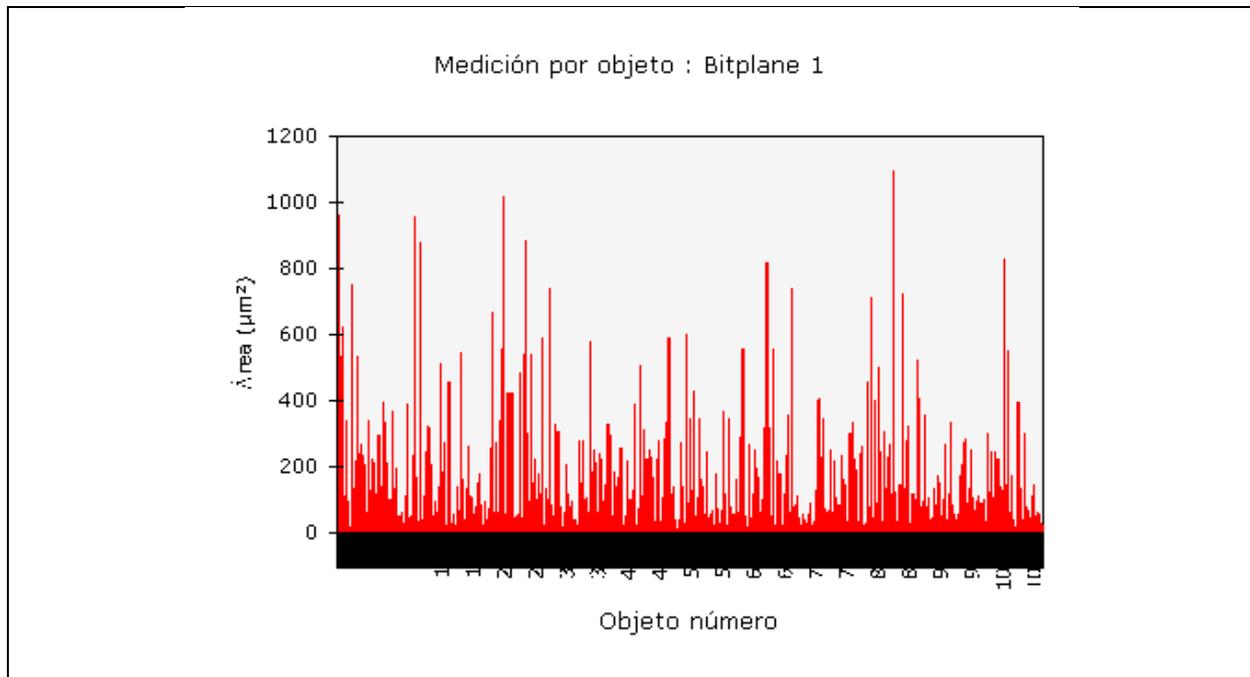
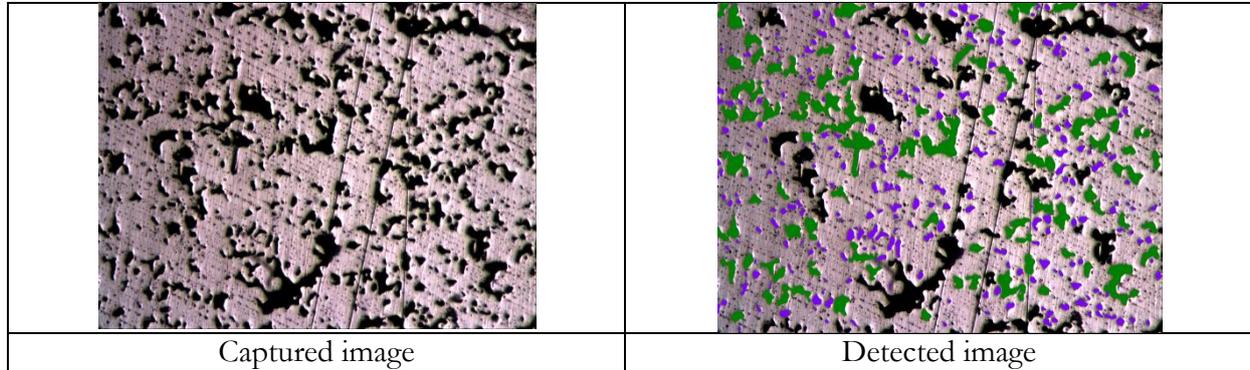


Measurement name:	Medición de campo	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	14,8496 %	Std dev:	1,4849 %
Total:	44,5487 %	95% CI:	3,69 %
Min:	13,7884 %	% RA:	24,84 %
Max:	16,9495 %	No fields of view:	3
Data points:	3	Total area analyzed:	664692,28 μm^2

Bicapa 316L [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa)

Capa 316L [$\frac{2}{3}$] - Área de los poros

Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-03-02	Magnification:	100x

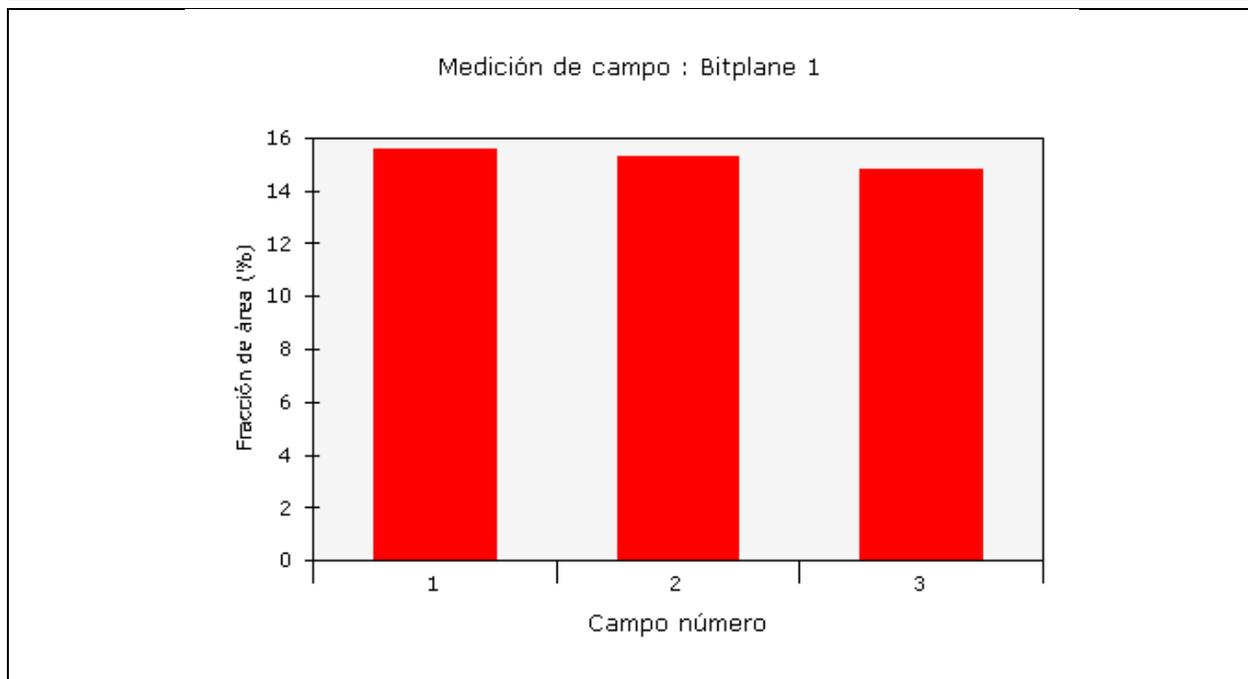
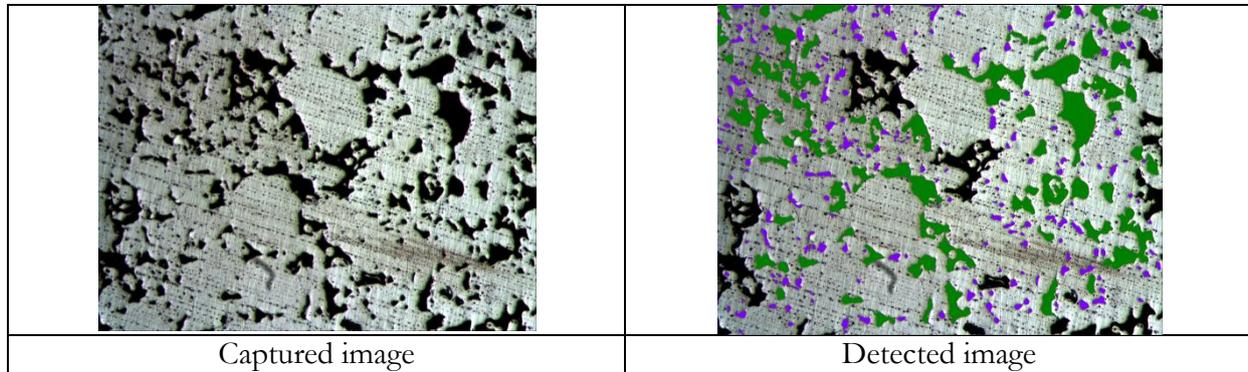


Measurement name:	Medición por objeto	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	90,7206 μm^2	Std dev:	136,4484 μm^2
Total:	98703,9986 μm^2	95% CI:	338,98 μm^2
Min:	3,5217 μm^2	% RA:	373,66 μm^2
Max:	1092,4914 μm^2	No fields of view:	3
Data points:	1088	Total area analyzed:	664692,28 μm^2

Bicapa 316L [$\frac{3}{8}$ - $\frac{1}{8}$] (750 MPa)

Capa Mezcla 316L [$\frac{1}{8}$] - Porosidad superficial

Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-03-02	Magnification:	100x

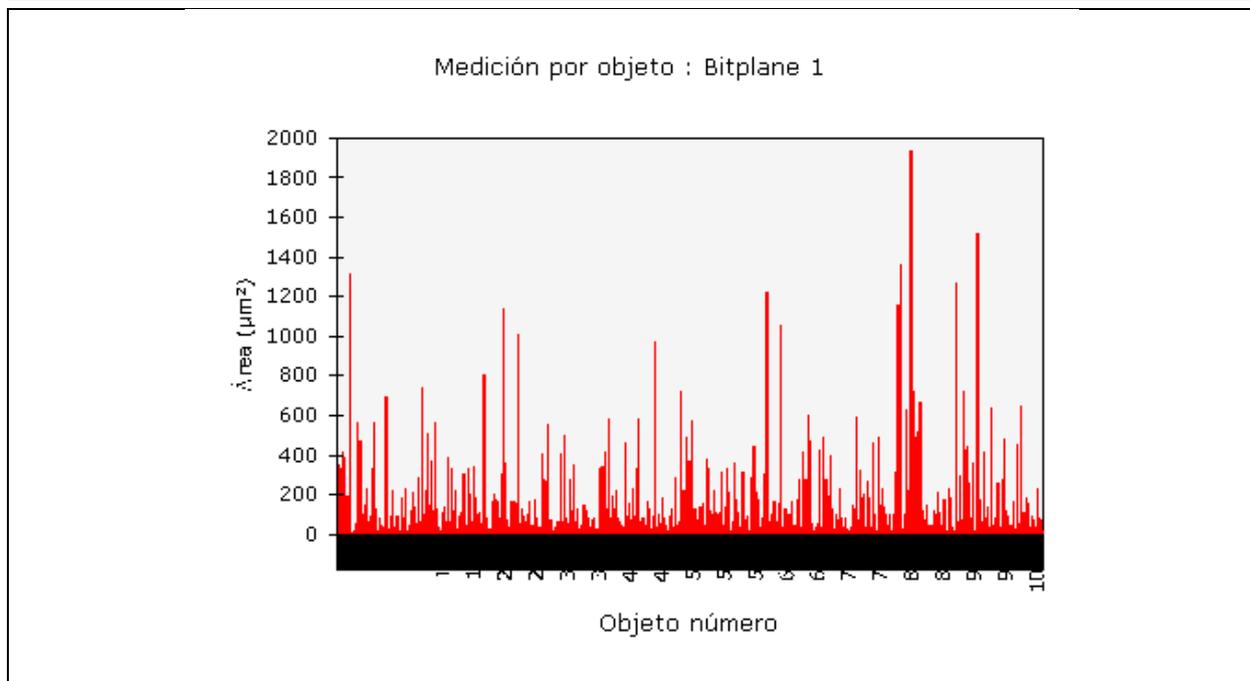
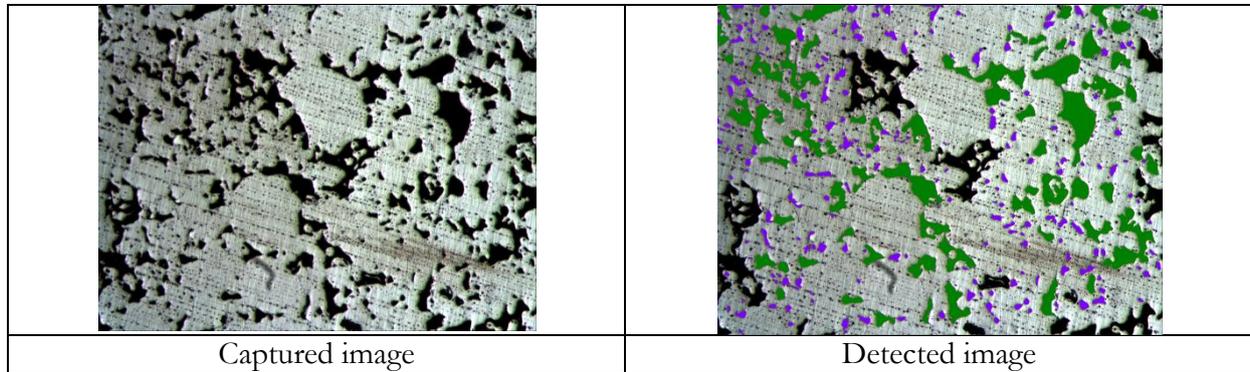


Measurement name:	Medición de campo	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	15,2226 %	Std dev:	0,2930 %
Total:	45,6677 %	95% CI:	0,73 %
Min:	14,8392 %	% RA:	4,78 %
Max:	15,5504 %	No fields of view:	3
Data points:	3	Total area analyzed:	664692,28 μm^2

Bicapa 316L [$\frac{1}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa)

Capa Mezcla 316L [$\frac{1}{3}$] - Área de los poros

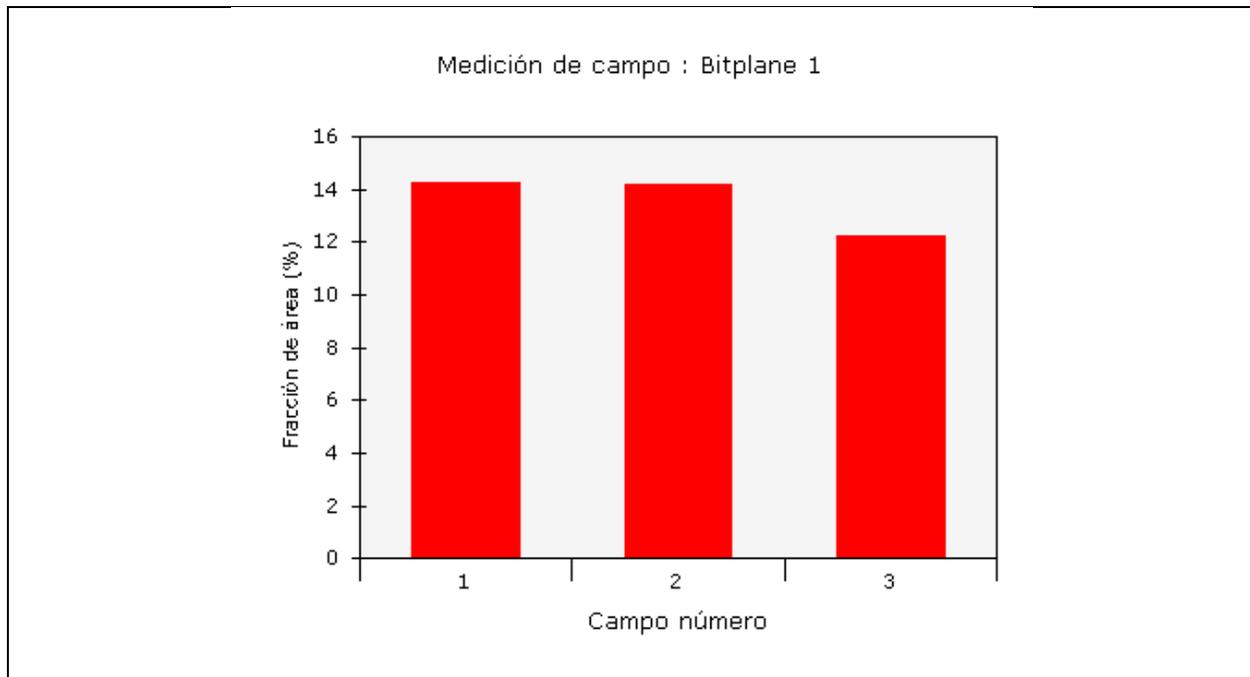
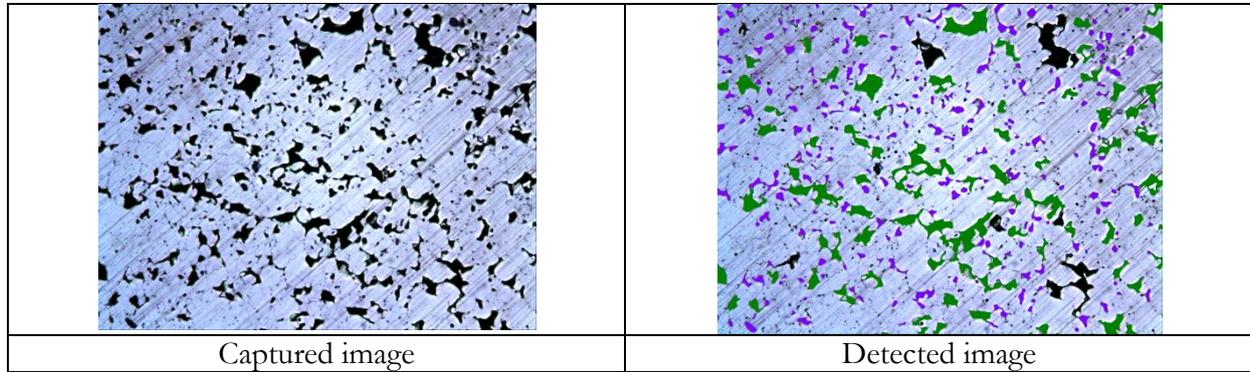
Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-03-02	Magnification:	100x



Measurement name:	Medición por objeto	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	97,3853 μm^2	Std dev:	175,9313 μm^2
Total:	101183,3222 μm^2	95% CI:	437,07 μm^2
Min:	3,7330 μm^2	% RA:	448,81 μm^2
Max:	1932,1975 μm^2	No fields of view:	3
Data points:	1039	Total area analyzed:	664692,28 μm^2

Bicapa 316L [1/2-1/2] (550 MPa)
Capa 316L [1/2] - Porosidad superficial

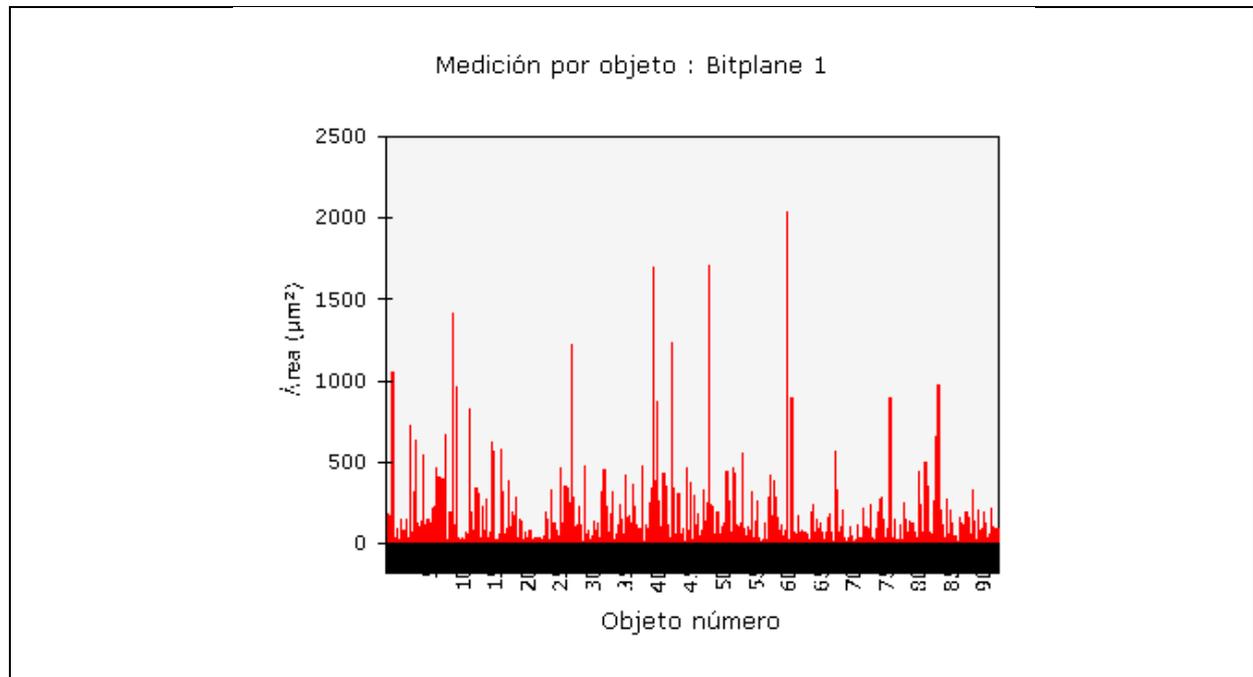
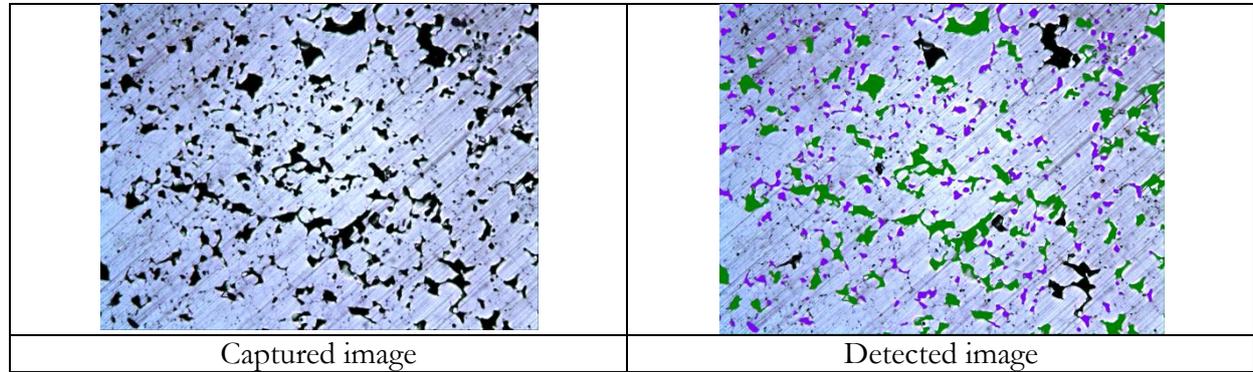
Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-04-25	Magnification:	100x



Measurement name:	Medición de campo	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	13,5493 %	Std dev:	0,9244 %
Total:	40,6479 %	95% CI:	2,30 %
Min:	12,2437 %	% RA:	16,95 %
Max:	14,2610 %	No fields of view:	3
Data points:	3	Total area analyzed:	664692,28 μm^2

Bicapa 316L [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (550 MPa) Capa 316L [$\frac{1}{2}$] - Área de los poros

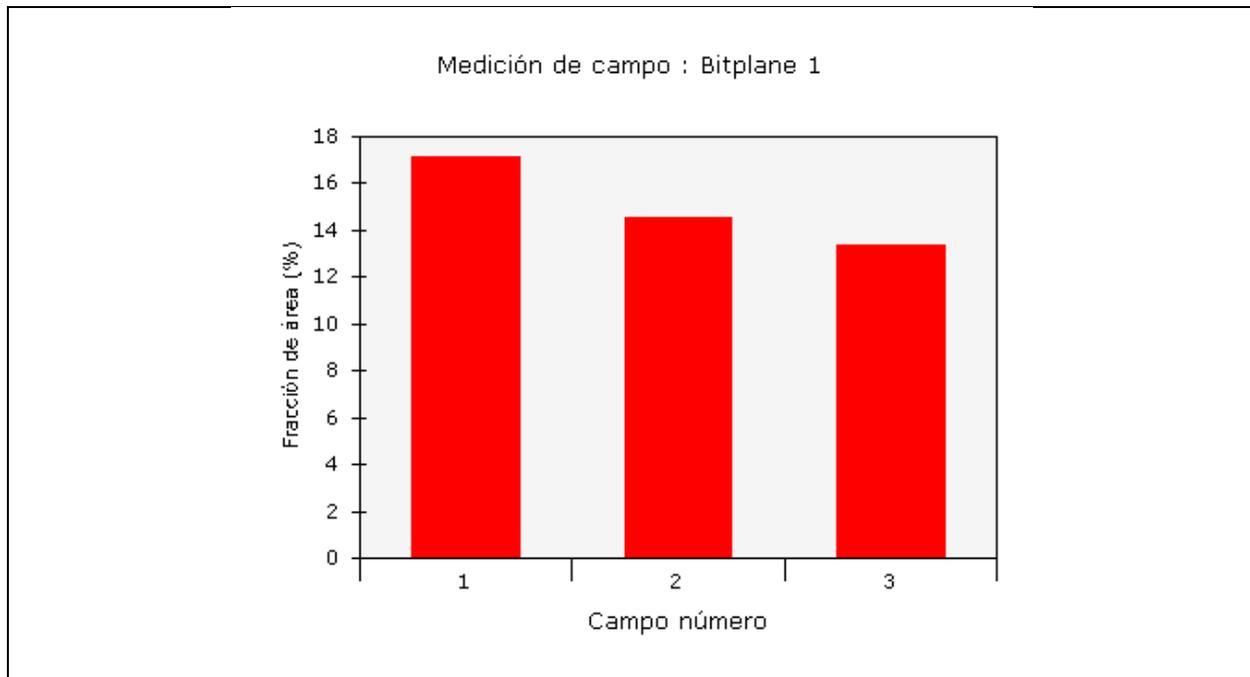
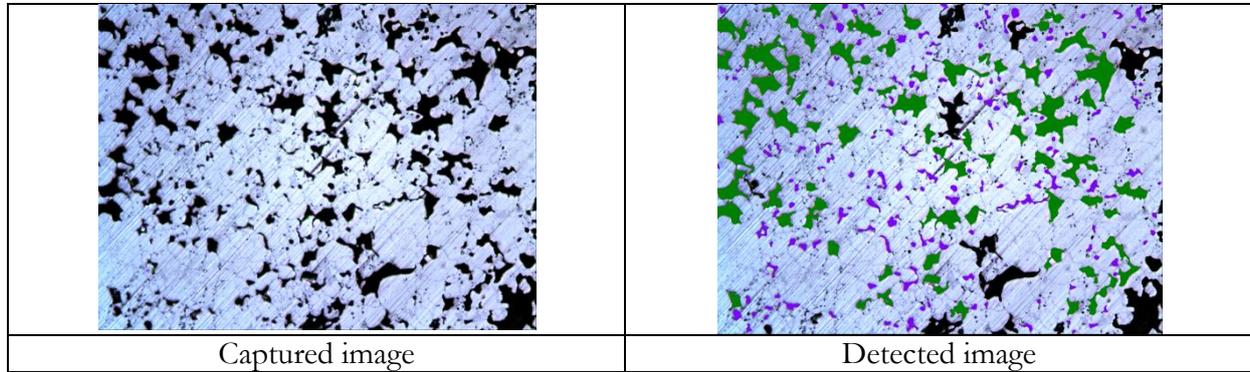
Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-04-25	Magnification:	100x



Measurement name:	Medición por objeto	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	95,7079 μm^2	Std dev:	175,8254 μm^2
Total:	90061,1249 μm^2	95% CI:	436,81 μm^2
Min:	4,7895 μm^2	% RA:	456,40 μm^2
Max:	2037,4249 μm^2	No fields of view:	3
Data points:	941	Total area analyzed:	664692,28 μm^2

Bicapa 316L [$1/2-1/2$] (550 MPa)
Capa Mezcla 316L [$1/2$] - Porosidad superficial

Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-04-25	Magnification:	100x

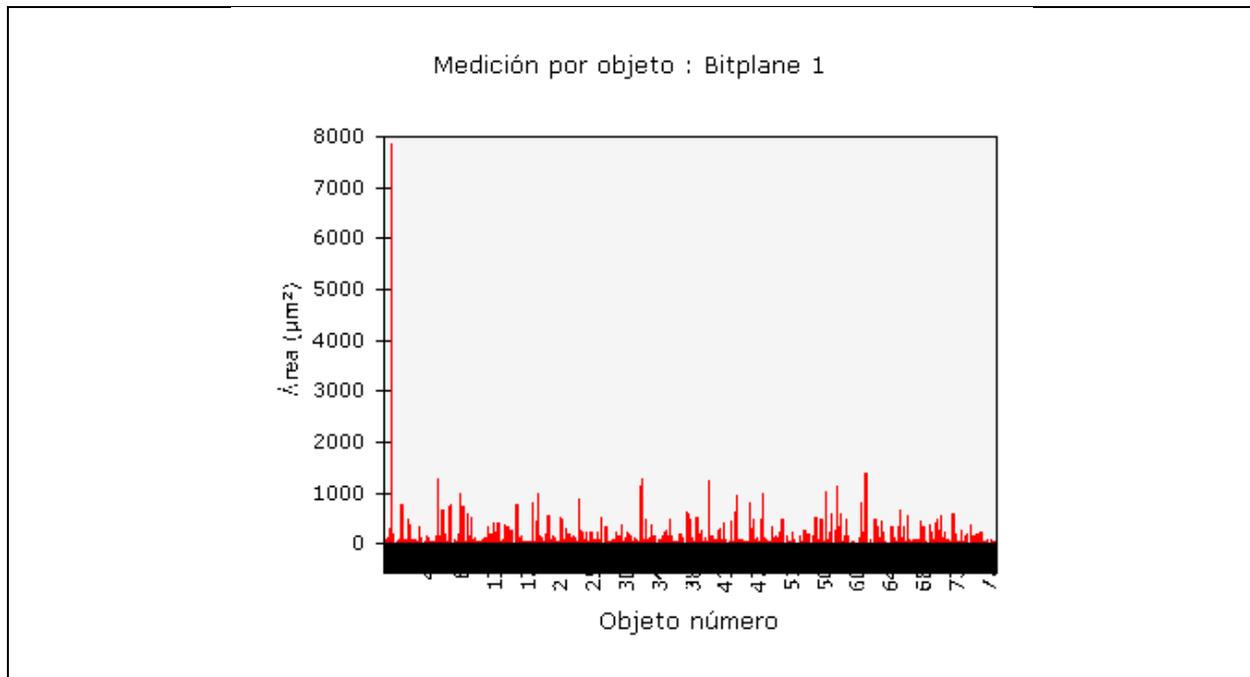
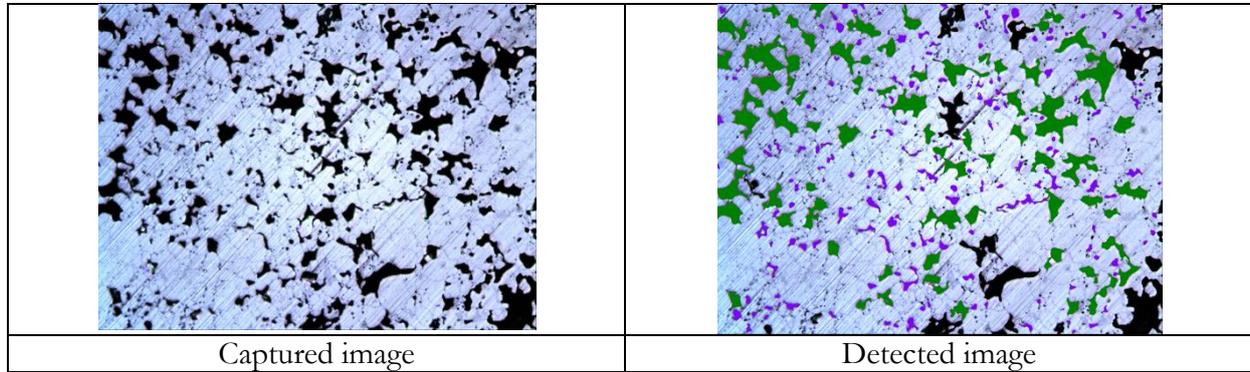


Measurement name:	Medición de campo	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	15,0199 %	Std dev:	1,5851 %
Total:	45,0597 %	95% CI:	3,94 %
Min:	13,3591 %	% RA:	26,22 %
Max:	17,1541 %	No fields of view:	3
Data points:	3	Total area analyzed:	664692,28 μm^2

Bicapa 316L [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (550 MPa)

Capa Mezcla 316L [$\frac{1}{2}$] - Área de los poros

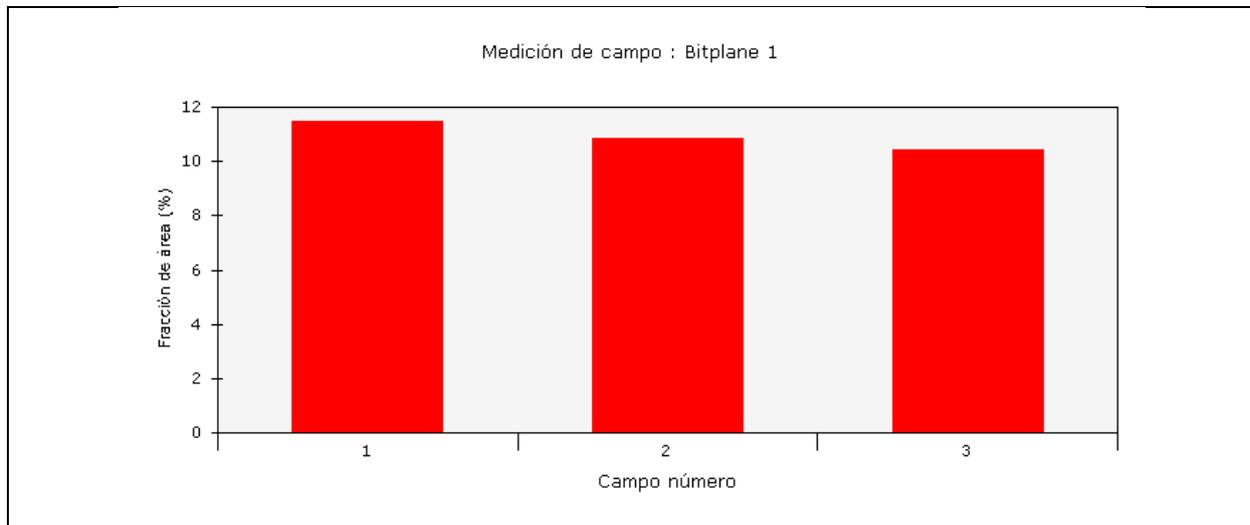
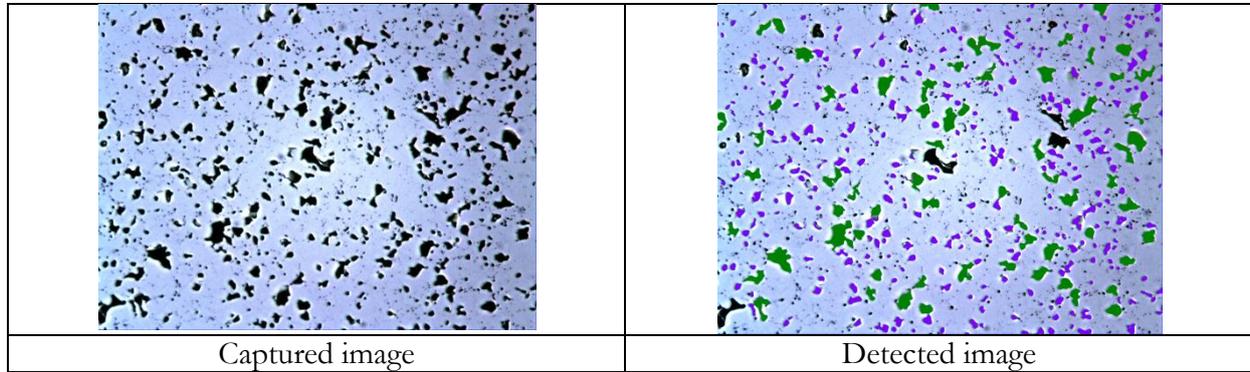
Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-04-25	Magnification:	100x



Measurement name:	Medición por objeto	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	124,9513 μm^2	Std dev:	332,9460 μm^2
Total:	99836,0735 μm^2	95% CI:	827,15 μm^2
Min:	5,0008 μm^2	% RA:	661,98 μm^2
Max:	7858,3873 μm^2	No fields of view:	3
Data points:	799	Total area analyzed:	664692,28 μm^2

Bicapa 316L [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (750 MPa)
Capa 316L [$\frac{1}{2}$] - Porosidad superficial

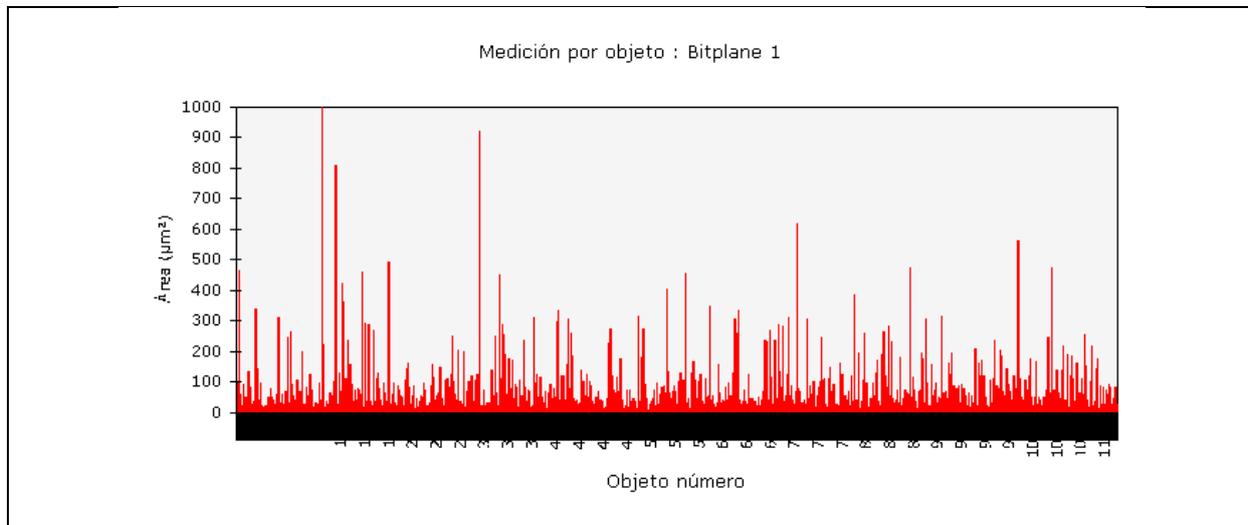
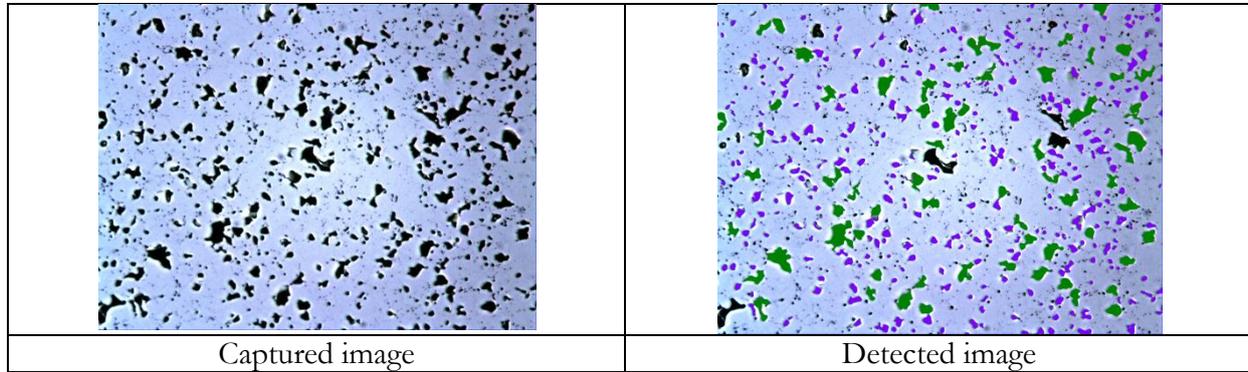
Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-05-03	Magnification:	100x



Measurement name:	Medición de campo	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	10,9007 %	Std dev:	0,4345 %
Total:	32,7020 %	95% CI:	1,08 %
Min:	10,4002 %	% RA:	9,90 %
Max:	11,4596 %	No fields of view:	3
Data points:	3	Total area analyzed:	664692,28 μm^2

Bicapa 316L [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (750 MPa) Capa 316L [$\frac{1}{2}$] - Área de los poros

Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-05-03	Magnification:	100x

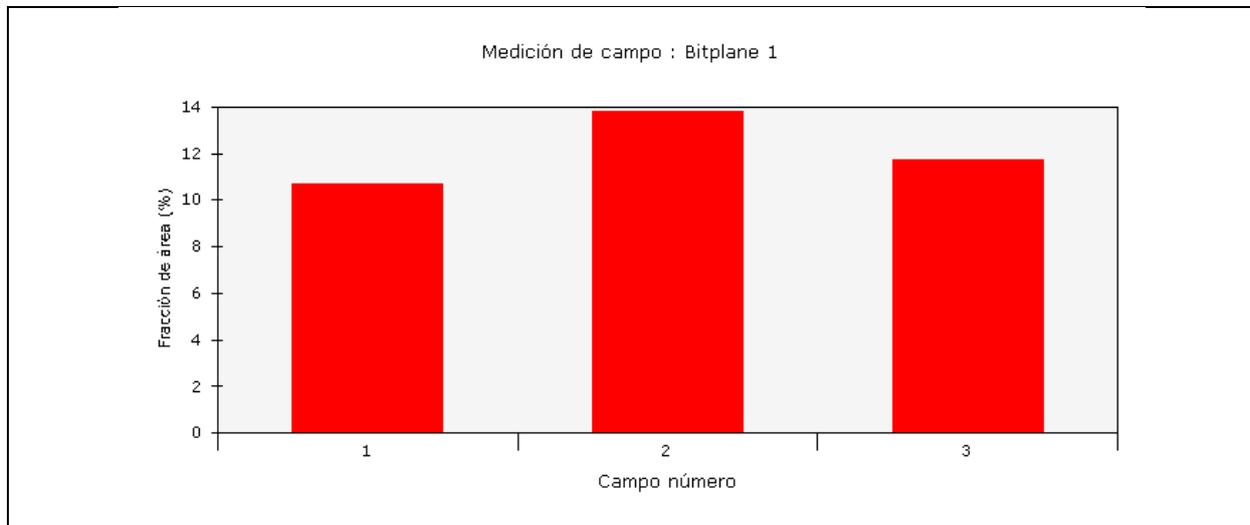
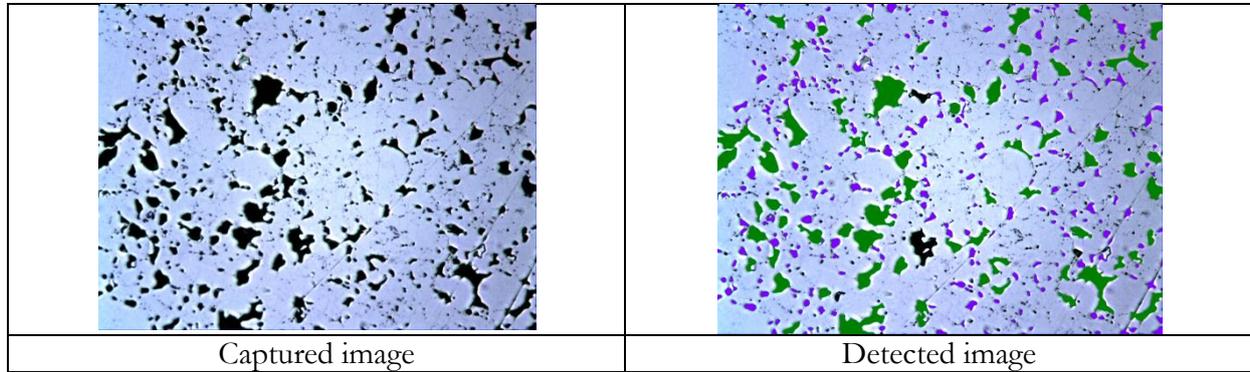


Measurement name:	Medición por objeto	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	63,2802 μm^2	Std dev:	86,7797 μm^2
Total:	72455,8214 μm^2	95% CI:	215,59 μm^2
Min:	4,4373 μm^2	% RA:	340,69 μm^2
Max:	997,8994 μm^2	No fields of view:	3
Data points:	1145	Total area analyzed:	664692,28 μm^2

Bicapa 316L [$1/2-1/2$] (750 MPa)

Capa Mezcla 316L [$1/2$] - Porosidad superficial

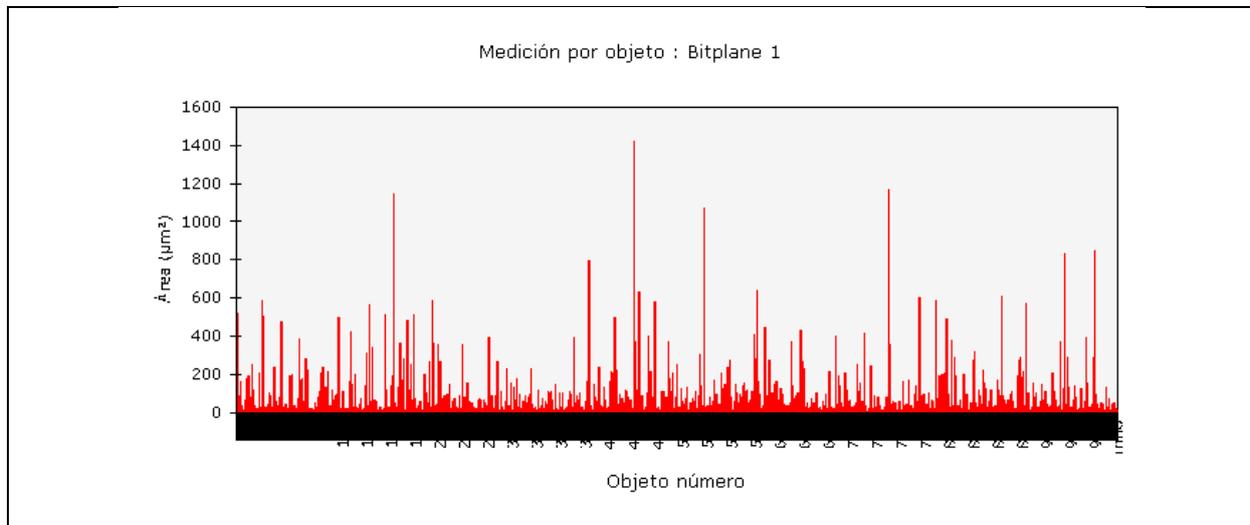
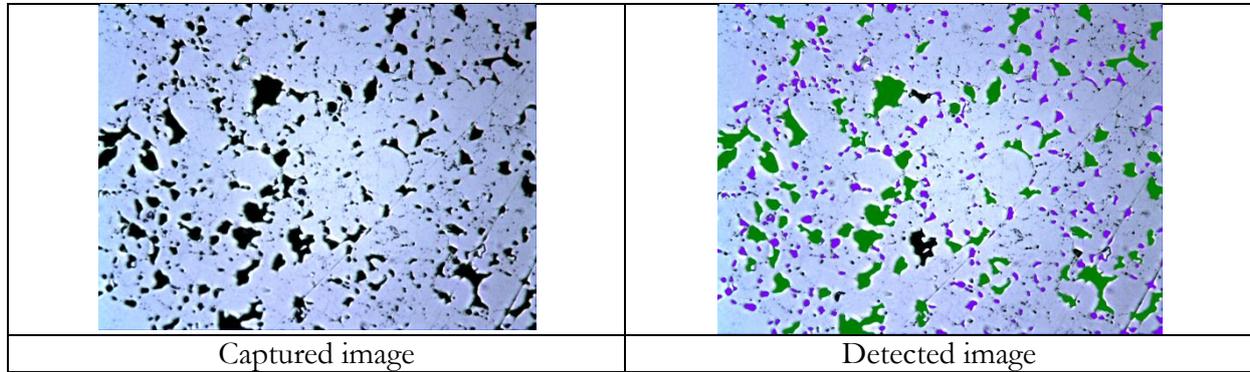
Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-05-03	Magnification:	100x



Measurement name:	Medición de campo	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	12,0952 %	Std dev:	1,3002 %
Total:	36,2856 %	95% CI:	3,23 %
Min:	10,7115 %	% RA:	26,71 %
Max:	13,8357 %	No fields of view:	3
Data points:	3	Total area analyzed:	664692,28 μm^2

Bicapa 316L [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (750 MPa) Capa Mezcla 316L [$\frac{1}{2}$] - Área de los poros

Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-05-03	Magnification:	100x

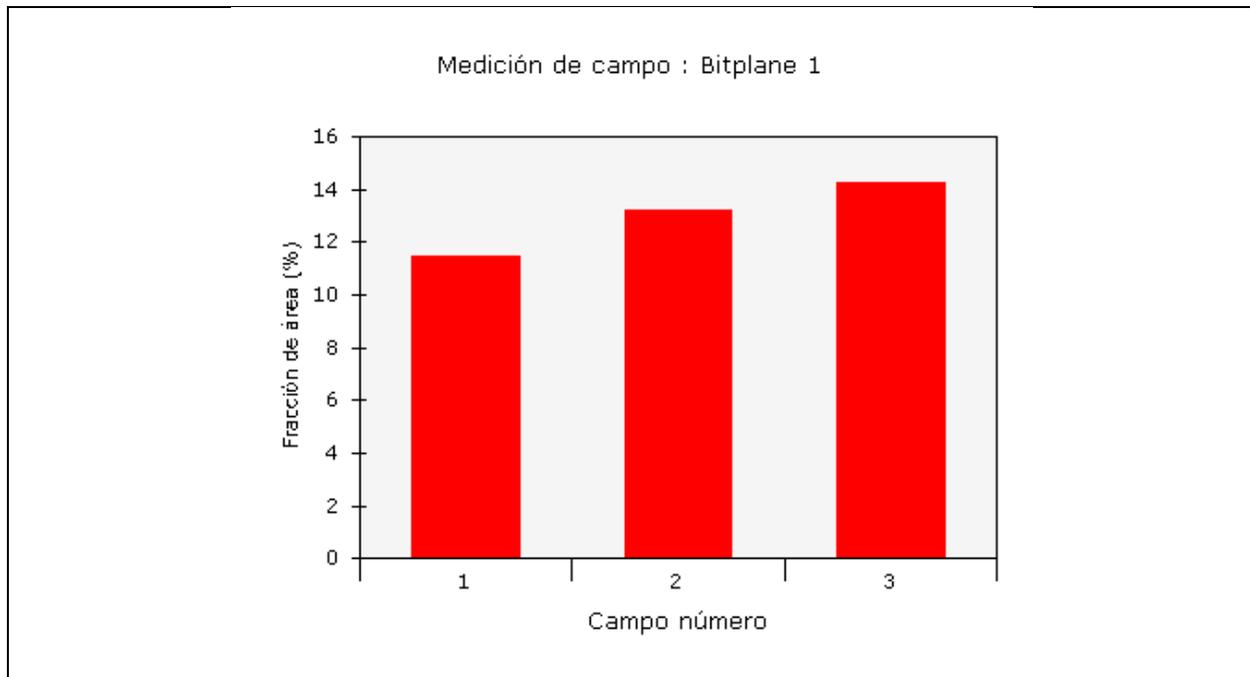
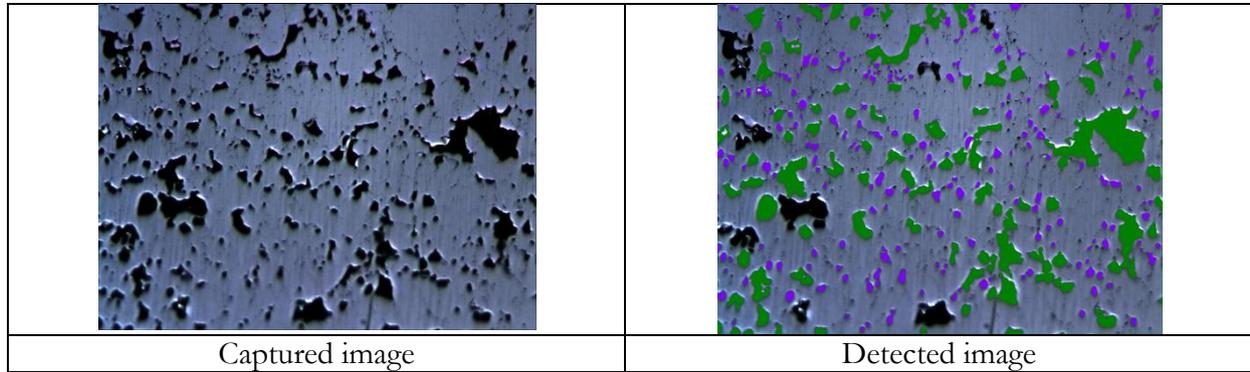


Measurement name:	Medición por objeto	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	79,2077 μm^2	Std dev:	130,2553 μm^2
Total:	80395,7705 μm^2	95% CI:	323,60 μm^2
Min:	3,3104 μm^2	% RA:	408,54 μm^2
Max:	1423,8802 μm^2	No fields of view:	3
Data points:	1015	Total area analyzed:	664692,28 μm^2

Bicapa 430L [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (750 MPa)

Capa 430L [$\frac{1}{2}$] - Porosidad superficial

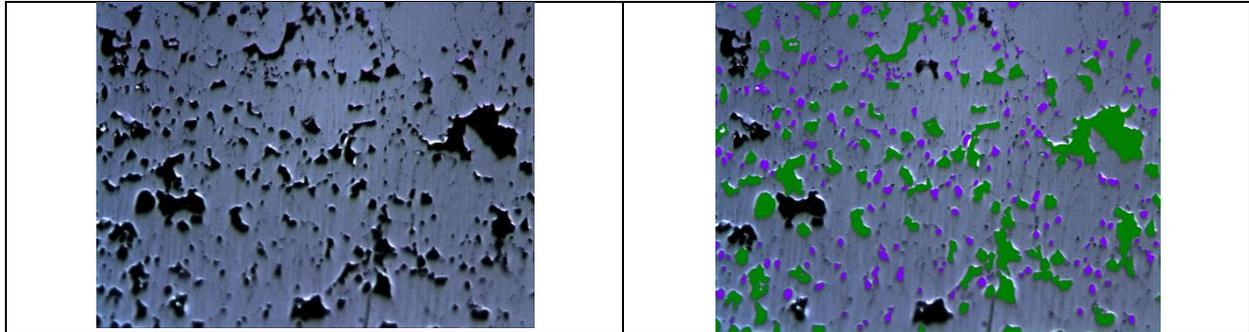
Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-04-26	Magnification:	100x



Measurement name:	Medición de campo	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	12,9661 %	Std dev:	1,1366 %
Total:	38,8983 %	95% CI:	2,82 %
Min:	11,4841 %	% RA:	21,78 %
Max:	14,2462 %	No fields of view:	3
Data points:	3	Total area analyzed:	664692,28 μm^2

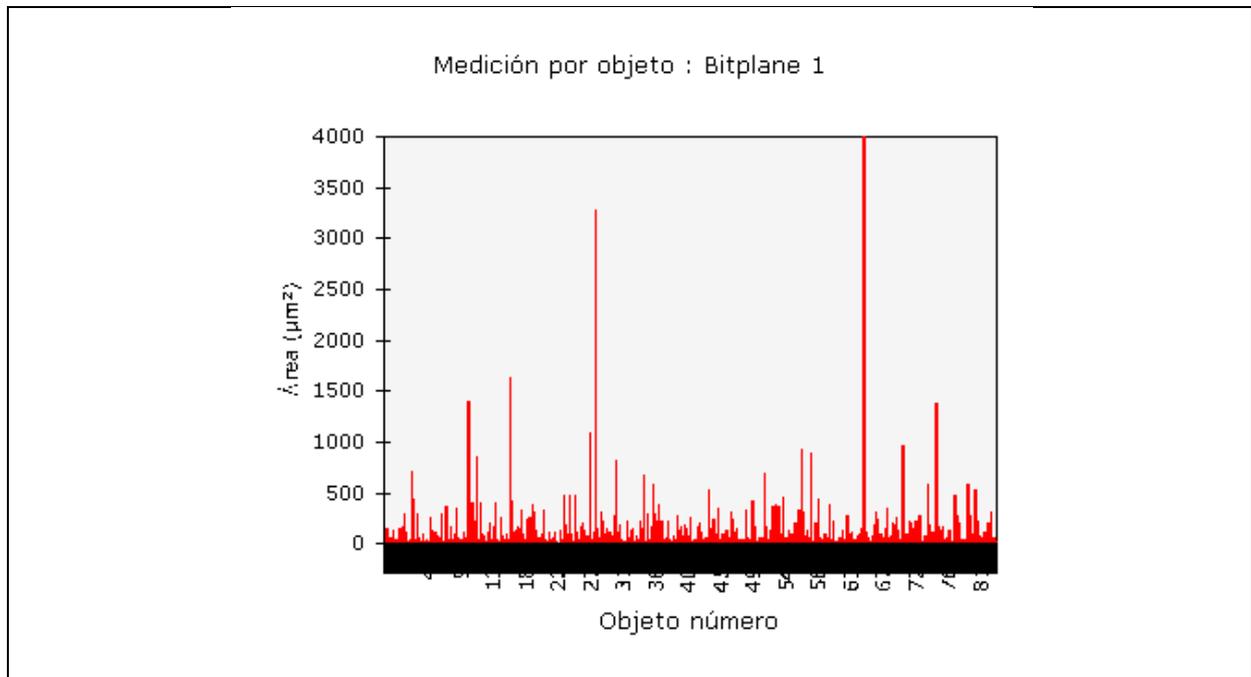
Bicapa 430L [$1/2-1/2$] (750 MPa)
Capa 430L [$1/2$] - Área de los poros

Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-04-26	Magnification:	100x



Captured image

Detected image

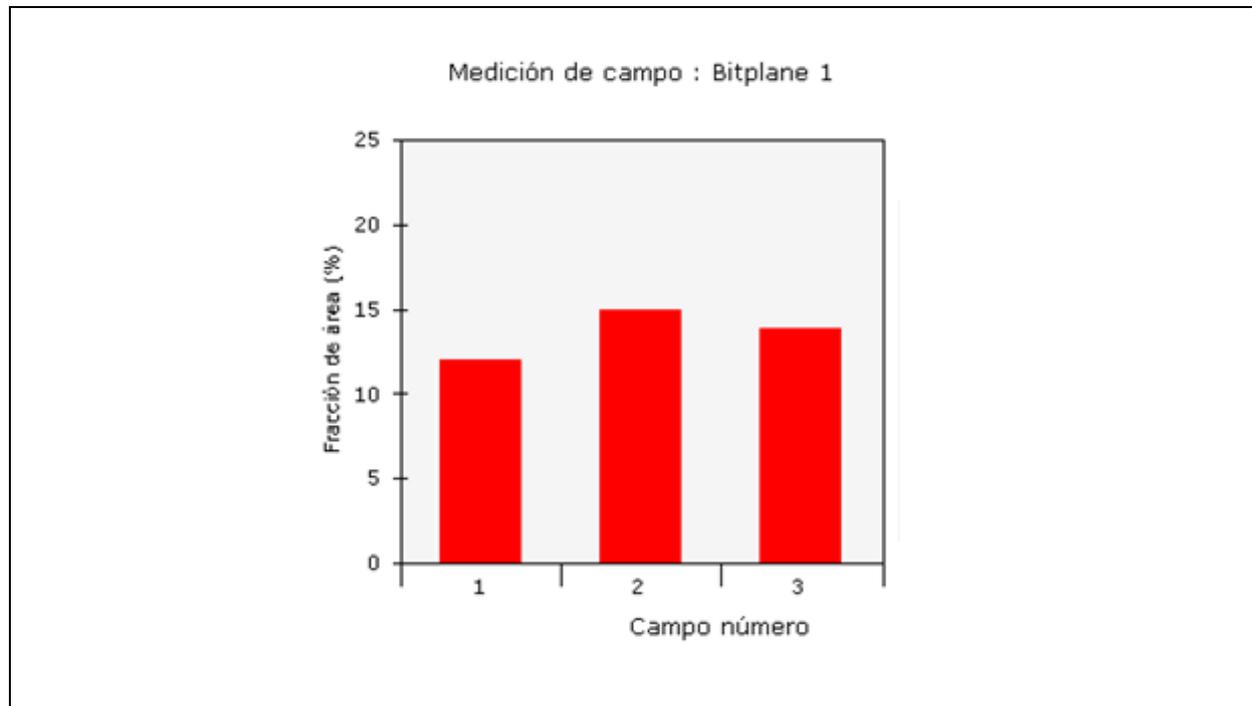
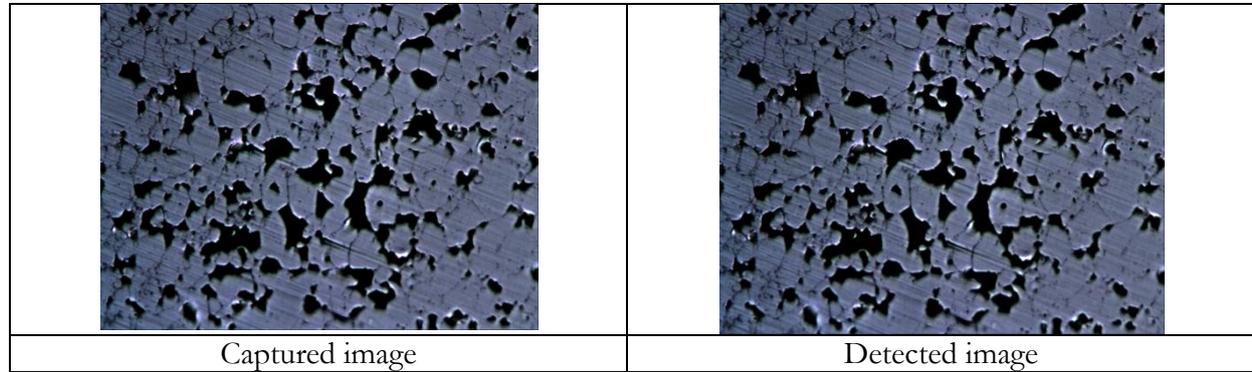


Measurement name:	Medición por objeto	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	101,6329 μm^2	Std dev:	231,7588 μm^2
Total:	86184,6858 μm^2	95% CI:	575,77 μm^2
Min:	4,2964 μm^2	% RA:	566,52 μm^2
Max:	3996,8801 μm^2	No fields of view:	3
Data points:	848	Total area analyzed:	664692,28 μm^2

Bicapa 430L [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (750 MPa)

Capa Mezcla 430L [$\frac{1}{2}$] - Porosidad superficial

Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-04-26	Magnification:	100x

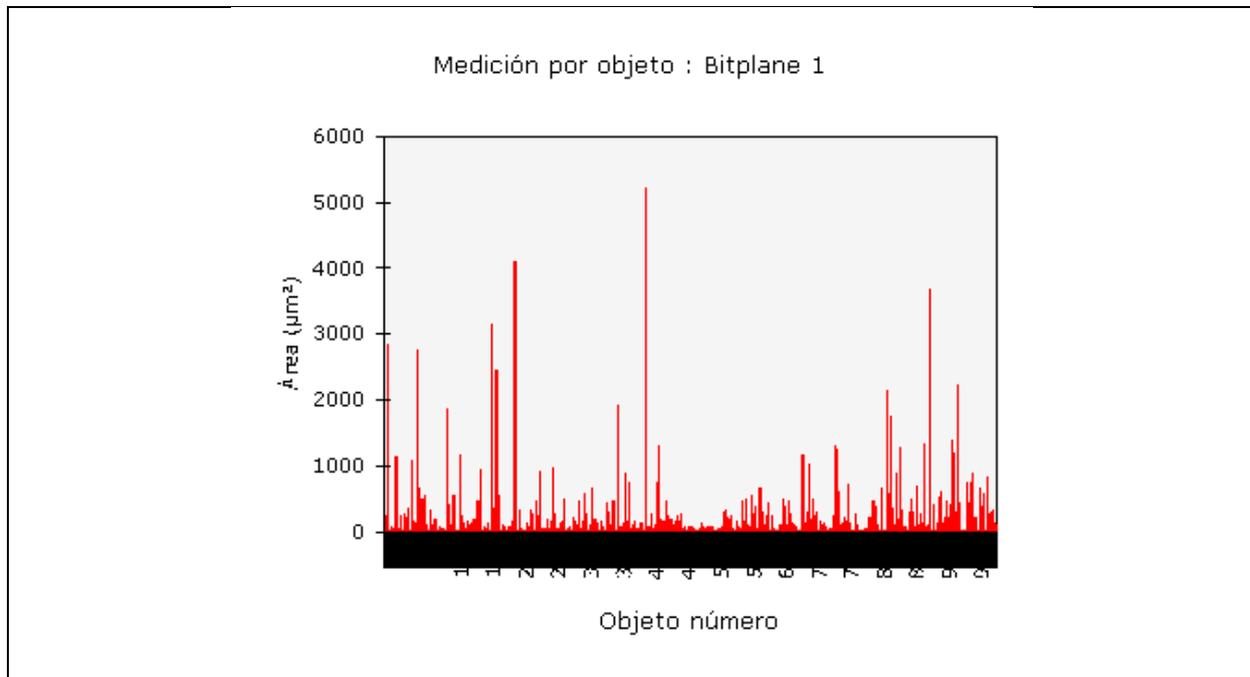
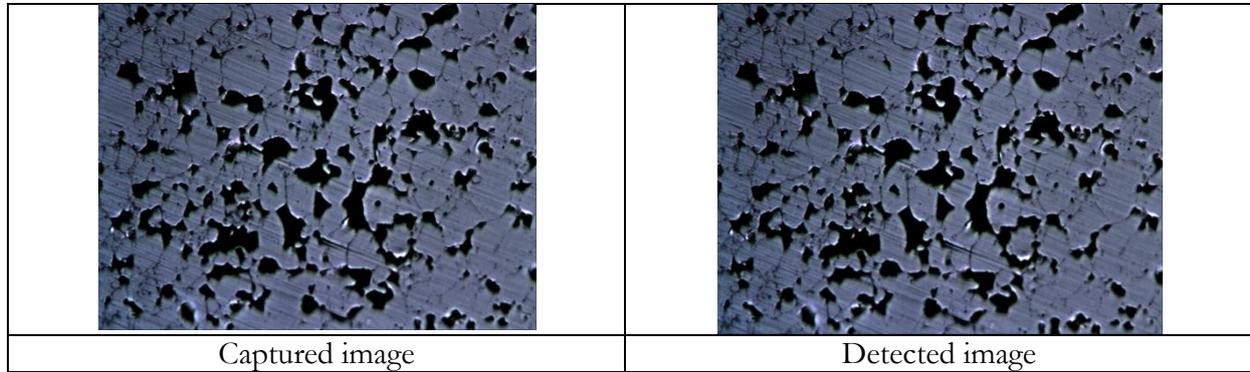


Measurement name:	Medición de campo	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	13,6171 %	Std dev:	1,4989 %
Total:	40,8513 %	95% CI:	5,93 %
Min:	12,0117 %	% RA:	37,81 %
Max:	14,98%	No fields of view:	3
Data points:	3	Total area analyzed:	886256,37 μm^2

Bicapa 430L [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (750 MPa)

Capa Mezcla 430L [$\frac{1}{2}$] - Área de los poros

Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-04-26	Magnification:	100x

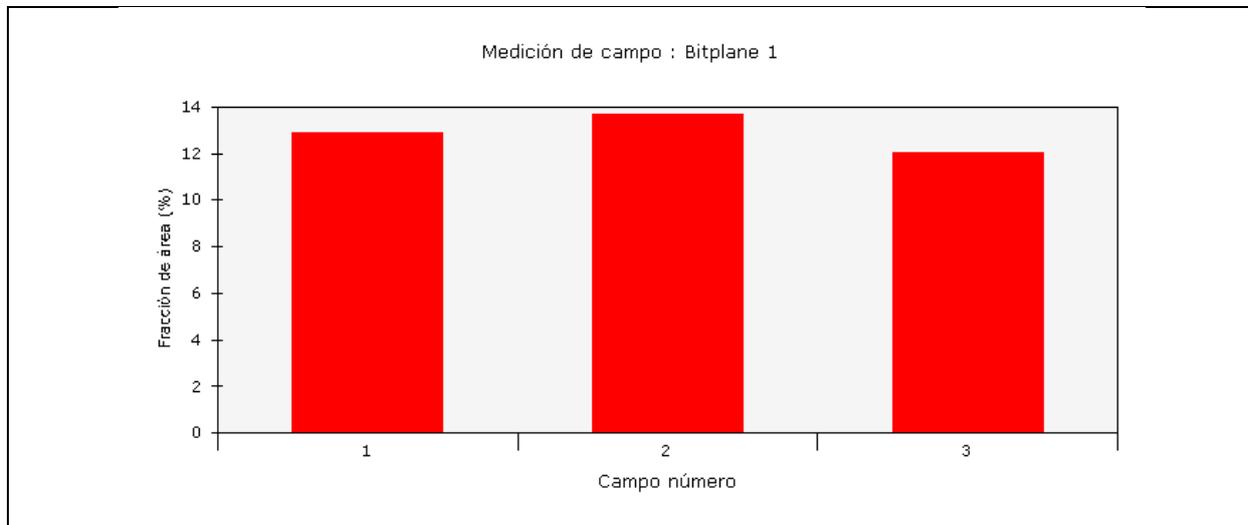
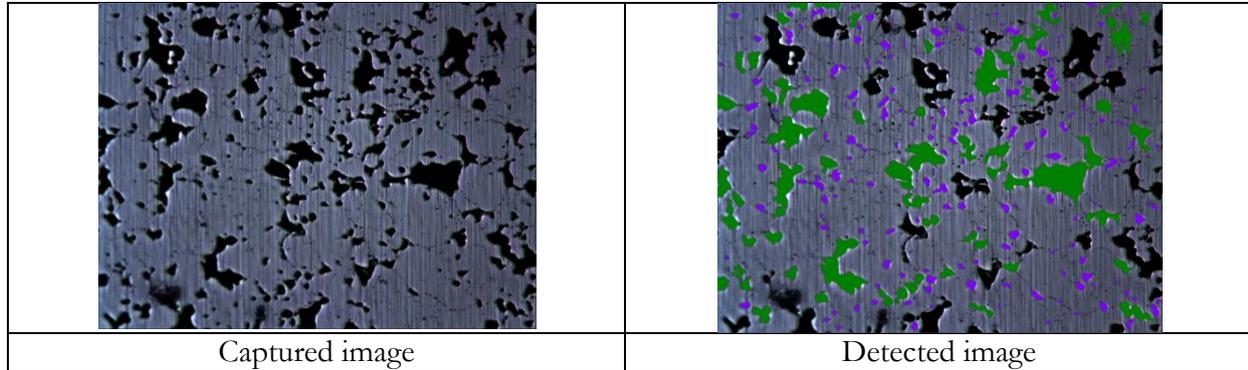


Measurement name:	Medición por objeto	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	136,7853 μm^2	Std dev:	371,8123 μm^2
Total:	138973,8315 μm^2	95% CI:	591,55 μm^2
Min:	4,0147 μm^2	% RA:	432,47 μm^2
Max:	5210,5872 μm^2	No fields of view:	3
Data points:	1016	Total area analyzed:	886256,37 μm^2

Bicapa 430L [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa)

Capa 430L [$\frac{2}{3}$] - Porosidad superficial

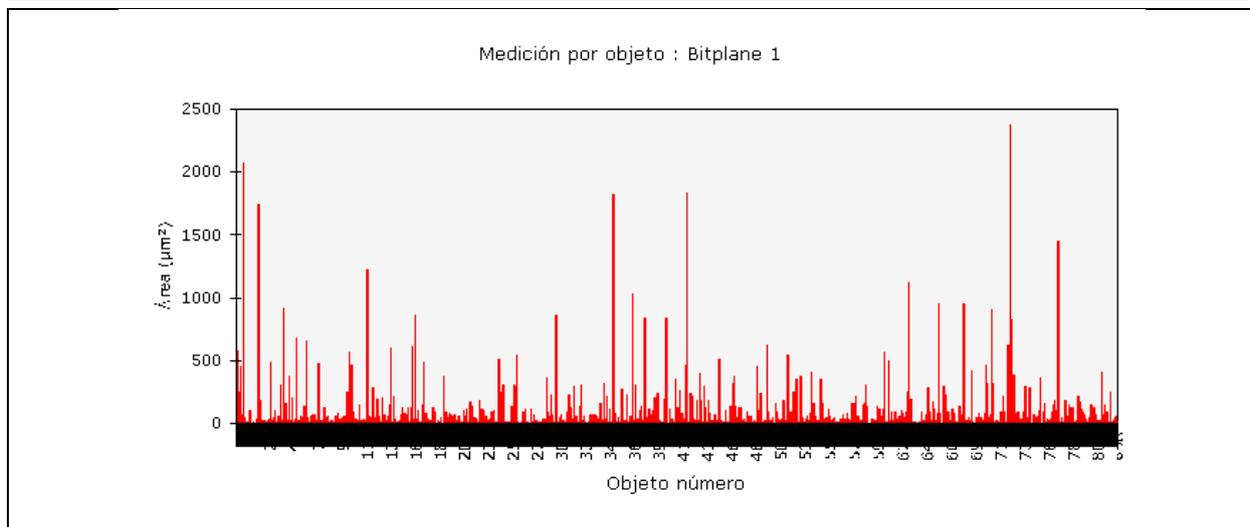
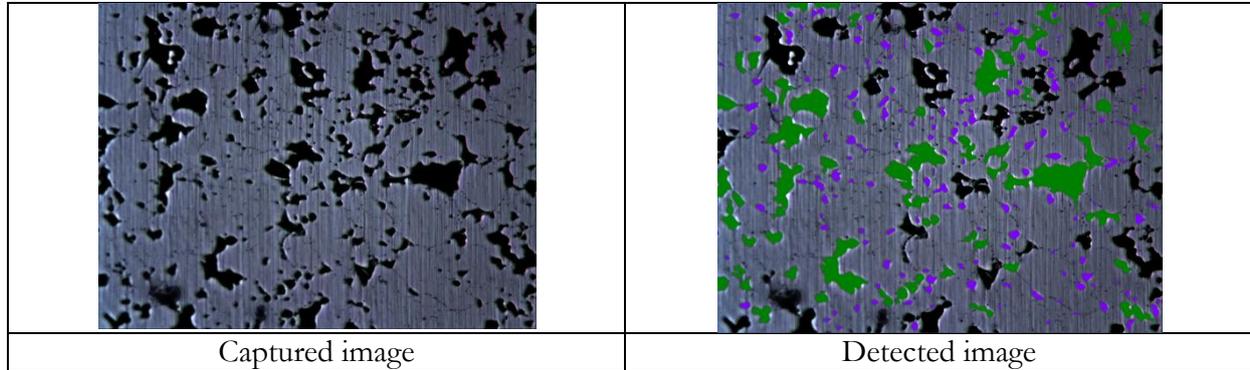
Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-05-09	Magnification:	100x



Measurement name:	Medición de campo	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	12,8568 %	Std dev:	0,6733 %
Total:	38,5705 %	95% CI:	1,67 %
Min:	12,0226 %	% RA:	13,01 %
Max:	13,6716 %	No fields of view:	3
Data points:	3	Total area analyzed:	664692,28 μm^2

Bicapa 430L [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa)
Capa 430L [$\frac{2}{3}$] - Área de los poros

Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-05-09	Magnification:	100x

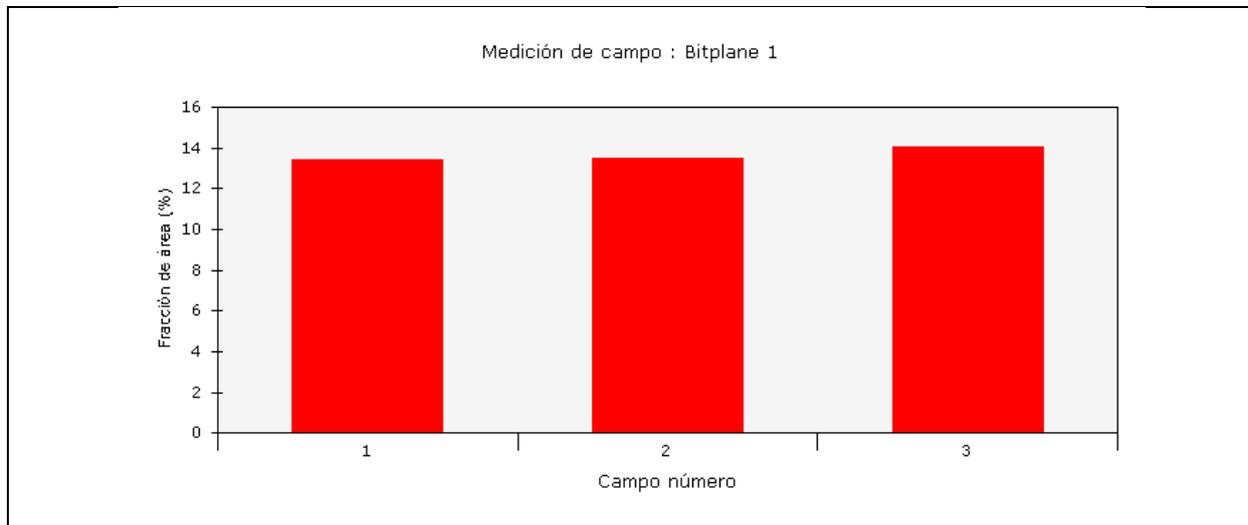
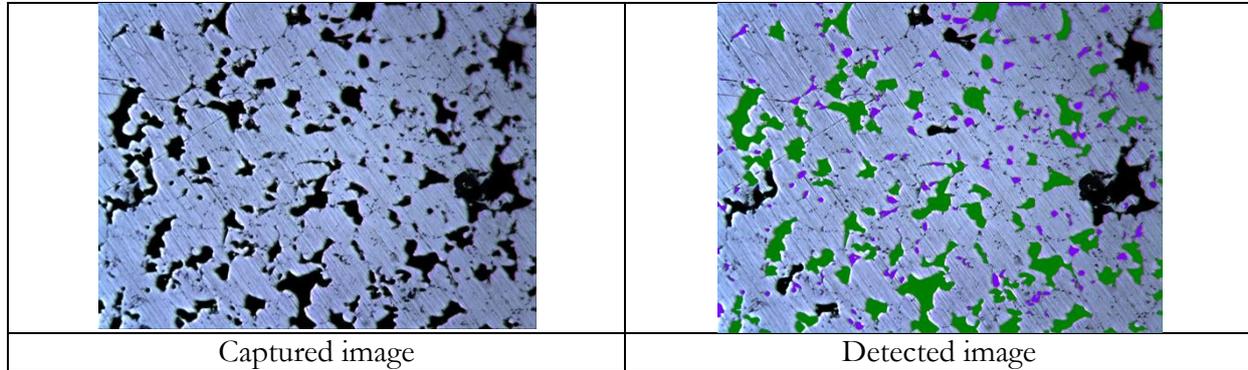


Measurement name:	Medición por objeto	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	102,7143 μm^2	Std dev:	215,1616 μm^2
Total:	85458,3069 μm^2	95% CI:	534,53 μm^2
Min:	2,9582 μm^2	% RA:	520,41 μm^2
Max:	2371,8423 μm^2	No fields of view:	3
Data points:	832	Total area analyzed:	664692,28 μm^2

Bicapa 430L [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa)

Capa Mezcla 430L [$\frac{1}{3}$] - Porosidad superficial

Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-05-08	Magnification:	100x

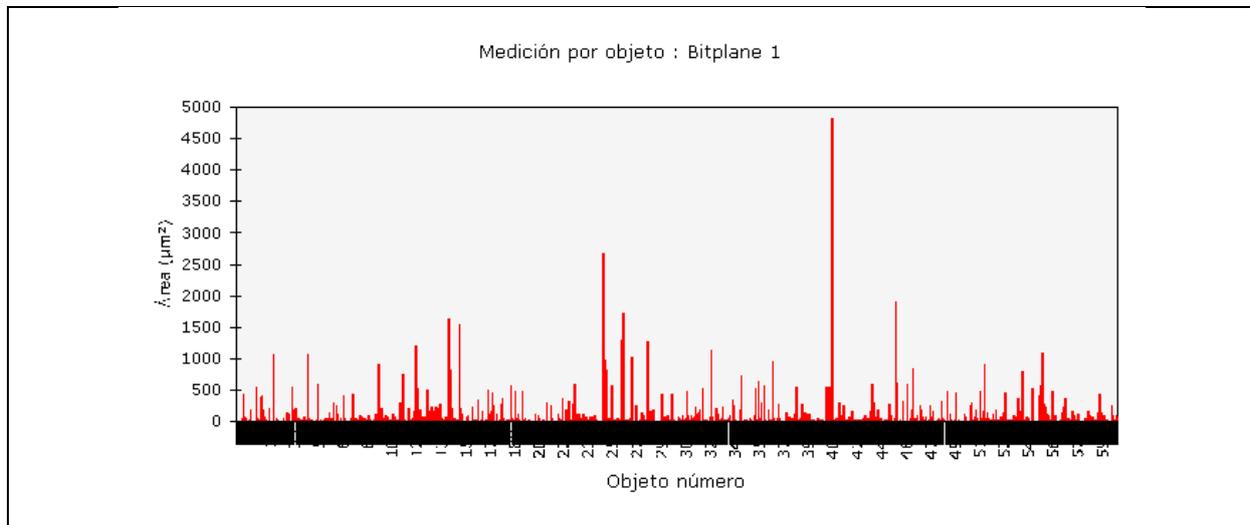
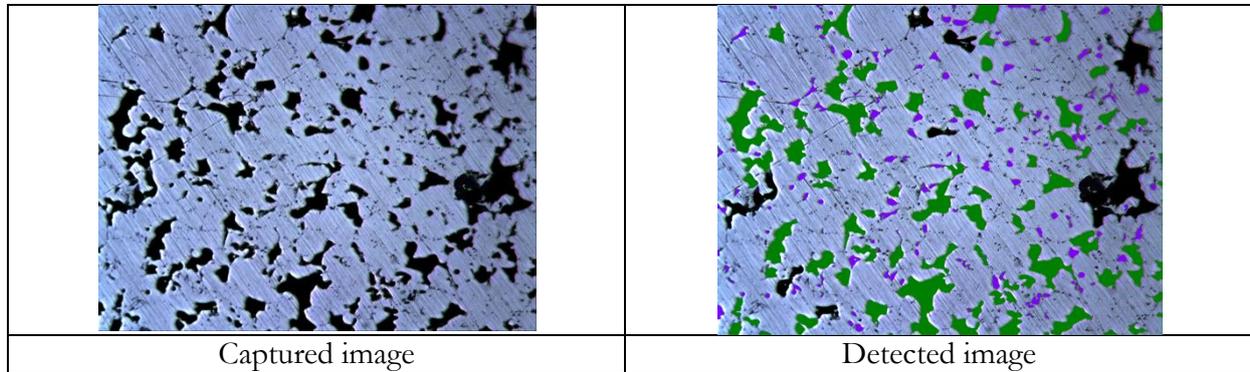


Measurement name:	Medición de campo	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	13,6245 %	Std dev:	0,2750 %
Total:	40,8735 %	95% CI:	0,68 %
Min:	13,3878 %	% RA:	5,01 %
Max:	14,0101 %	No fields of view:	3
Data points:	3	Total area analyzed:	664692,28 μm^2

Bicapa 430L [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa)

Capa Mezcla 430L [$\frac{1}{3}$] - Área de los poros

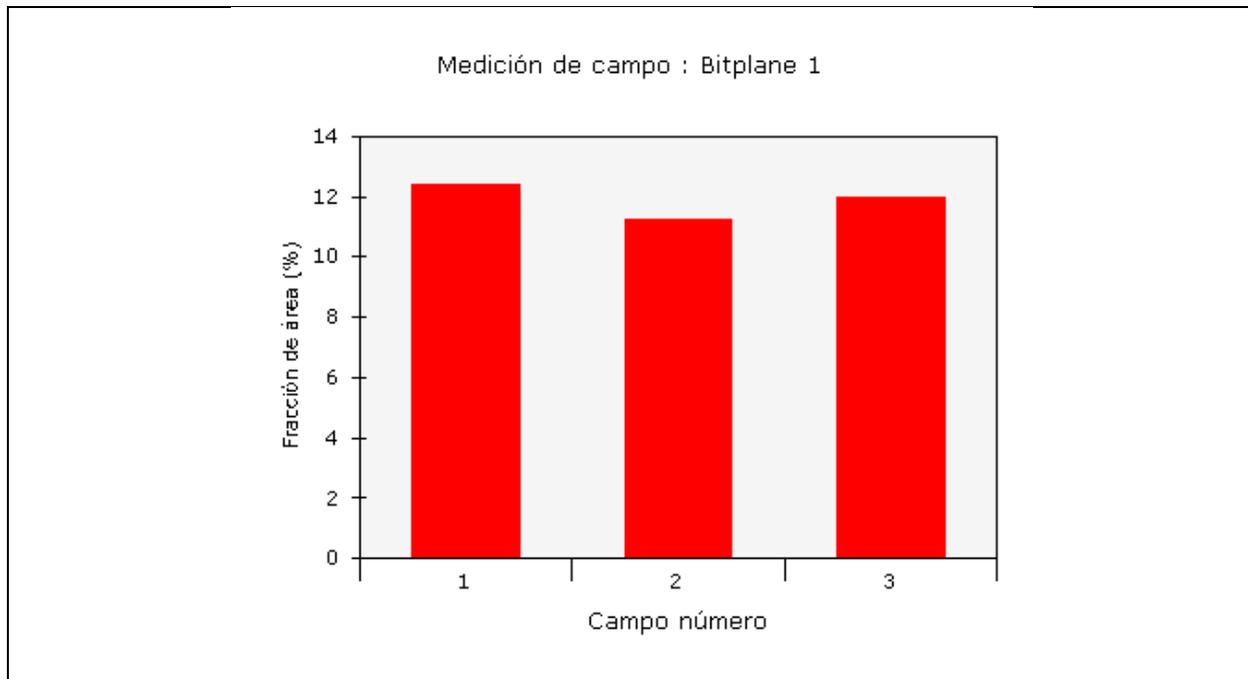
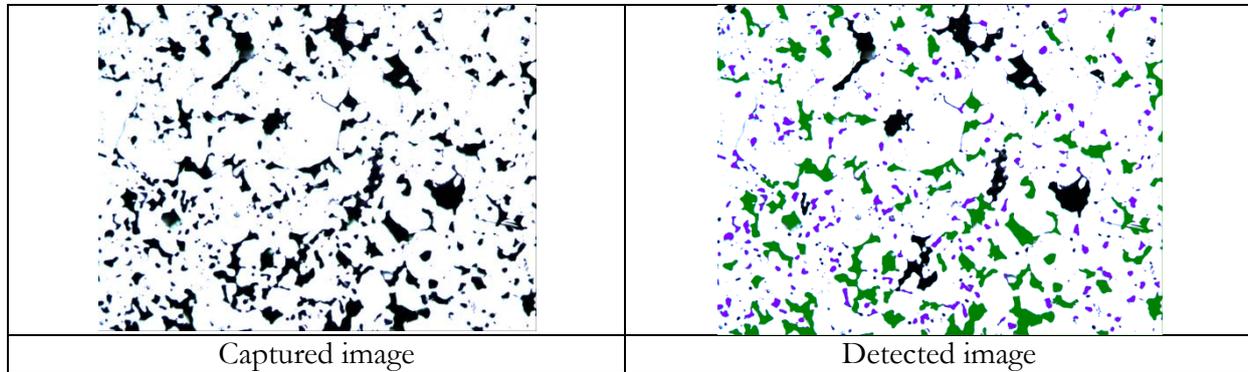
Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-05-08	Magnification:	100x



Measurement name:	Medición por objeto	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	147,9756 μm^2	Std dev:	321,0230 μm^2
Total:	90561,0606 μm^2	95% CI:	797,53 μm^2
Min:	5,6347 μm^2	% RA:	538,96 μm^2
Max:	4821,7248 μm^2	No fields of view:	3
Data points:	612	Total area analyzed:	664692,28 μm^2

Bicapa 50/50 [2/3-1/3] (750 MPa)
Capa 50/50 [2/3] - Porosidad superficial

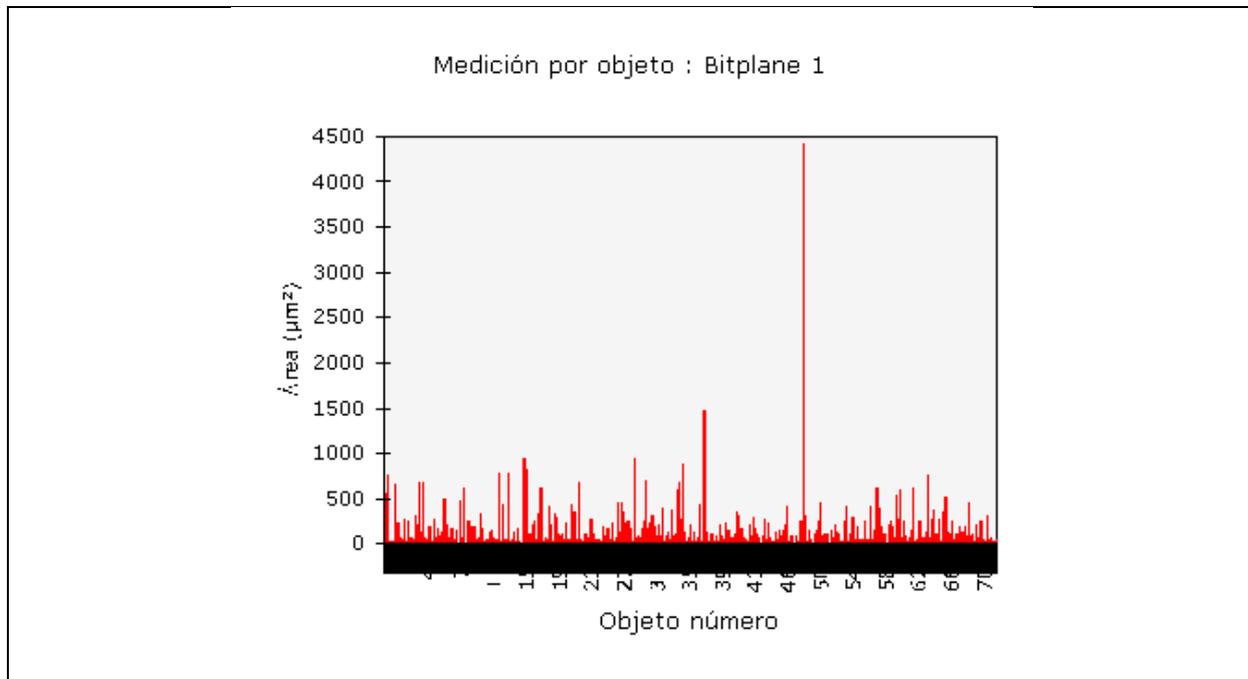
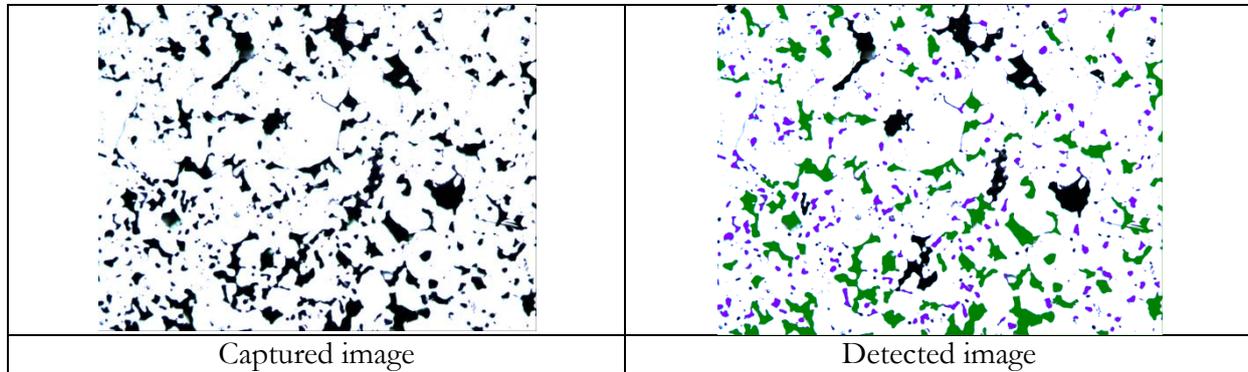
Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-04-25	Magnification:	100x



Measurement name:	Medición de campo	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	11,8860 %	Std dev:	0,4737 %
Total:	35,6580 %	95% CI:	1,18 %
Min:	11,2631 %	% RA:	9,90 %
Max:	12,4109 %	No fields of view:	3
Data points:	3	Total area analyzed:	664692,28 μm^2

Bicapa 50/50 [2/3-1/3] (750 MPa)
Capa 50/50 [2/3] – Área de los poros

Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-04-25	Magnification:	100x

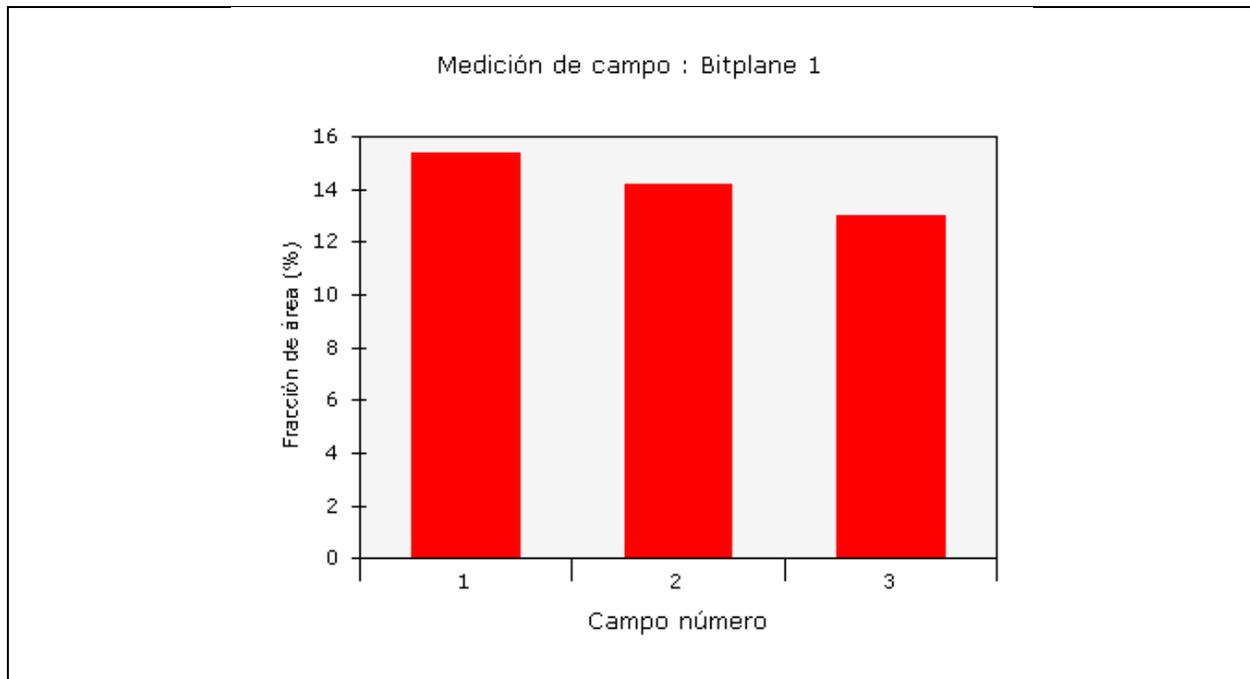
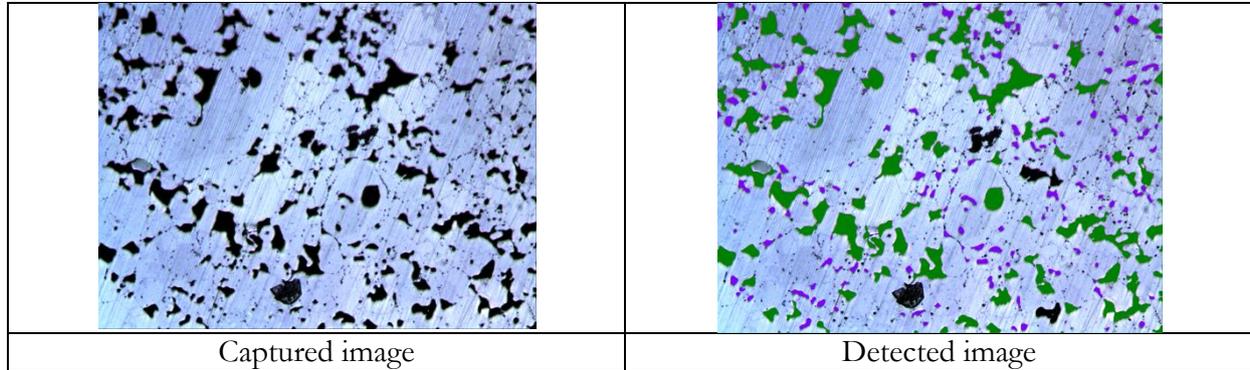


Measurement name:	Medición por objeto	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	108,0784 μm^2	Std dev:	222,6756 μm^2
Total:	79005,3462 μm^2	95% CI:	553,20 μm^2
Min:	6,0573 μm^2	% RA:	511,85 μm^2
Max:	4425,4669 μm^2	No fields of view:	3
Data points:	731	Total area analyzed:	664692,28 μm^2

Bicapa 50/50 [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa)

Capa Mezcla 50/50 [$\frac{1}{3}$] - Porosidad superficial

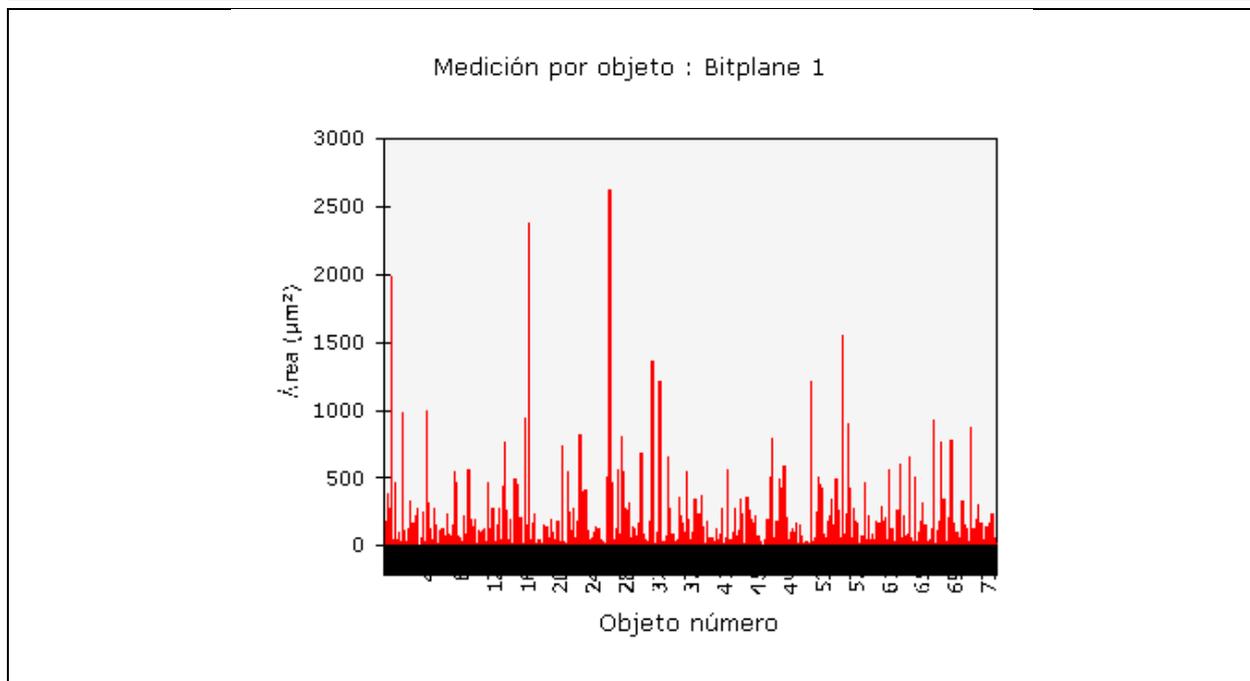
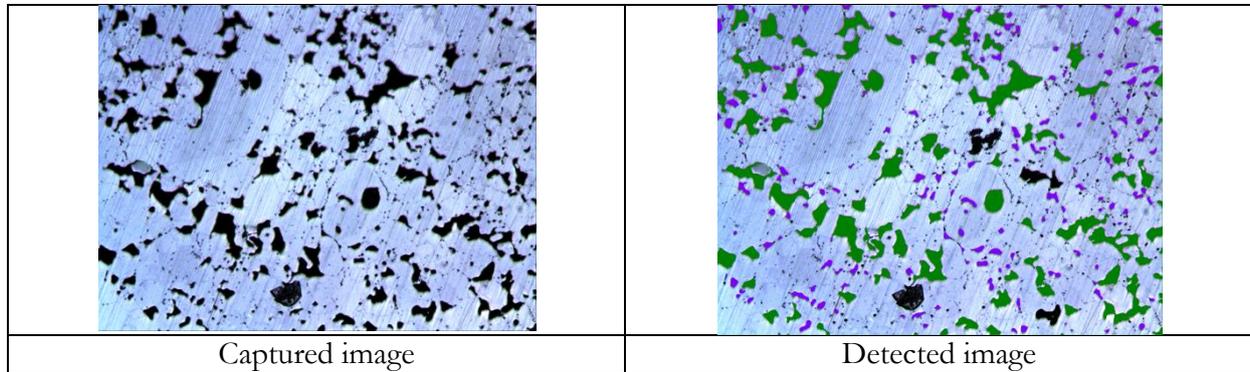
Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-04-26	Magnification:	100x



Measurement name:	Medición de campo	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	14,1989 %	Std dev:	0,9680 %
Total:	42,5967 %	95% CI:	2,40 %
Min:	13,0122 %	% RA:	16,94 %
Max:	15,3832 %	No fields of view:	3
Data points:	3	Total area analyzed:	664692,28 μm^2

Bicapa 50/50 [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa)
Capa Mezcla 50/50 [$\frac{1}{3}$] - Área de los poros

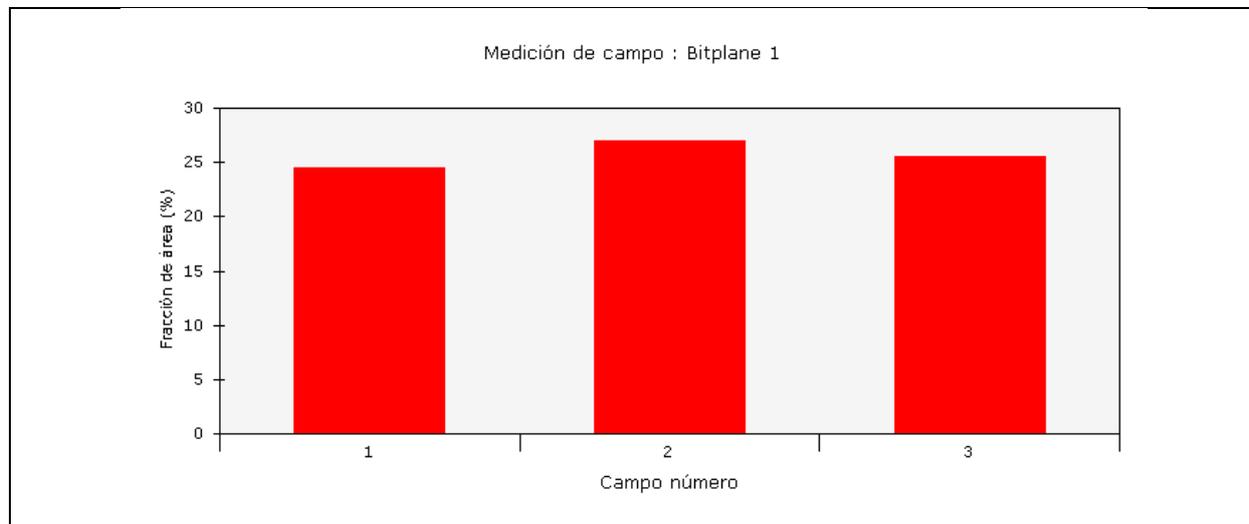
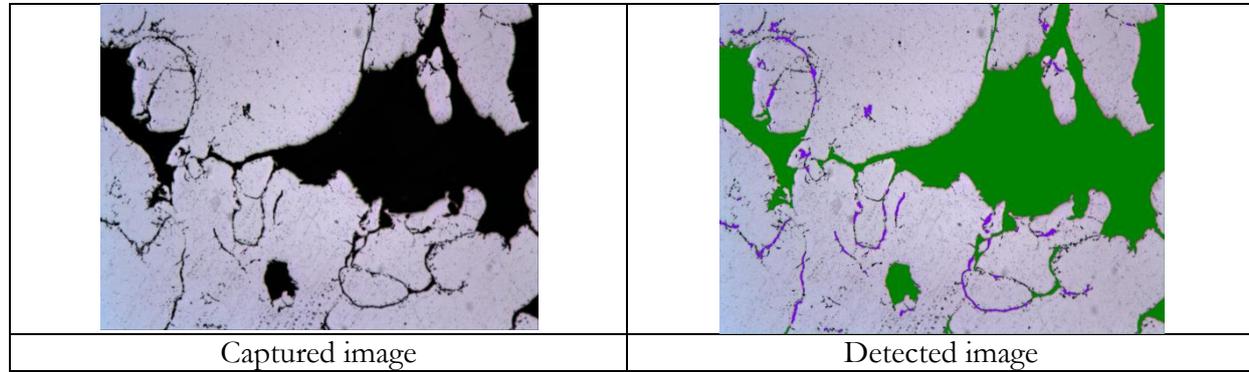
Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-04-26	Magnification:	100x



Measurement name:	Medición por objeto	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	123,6946 μm^2	Std dev:	228,3320 μm^2
Total:	94378,9696 μm^2	95% CI:	567,25 μm^2
Min:	4,6486 μm^2	% RA:	458,59 μm^2
Max:	2619,7676 μm^2	No fields of view:	3
Data points:	763	Total area analyzed:	664692,28 μm^2

Bicapa Austenítica [½-½] (550 MPa)
Capa 316L [300-500 μm] [½] - Porosidad superficial

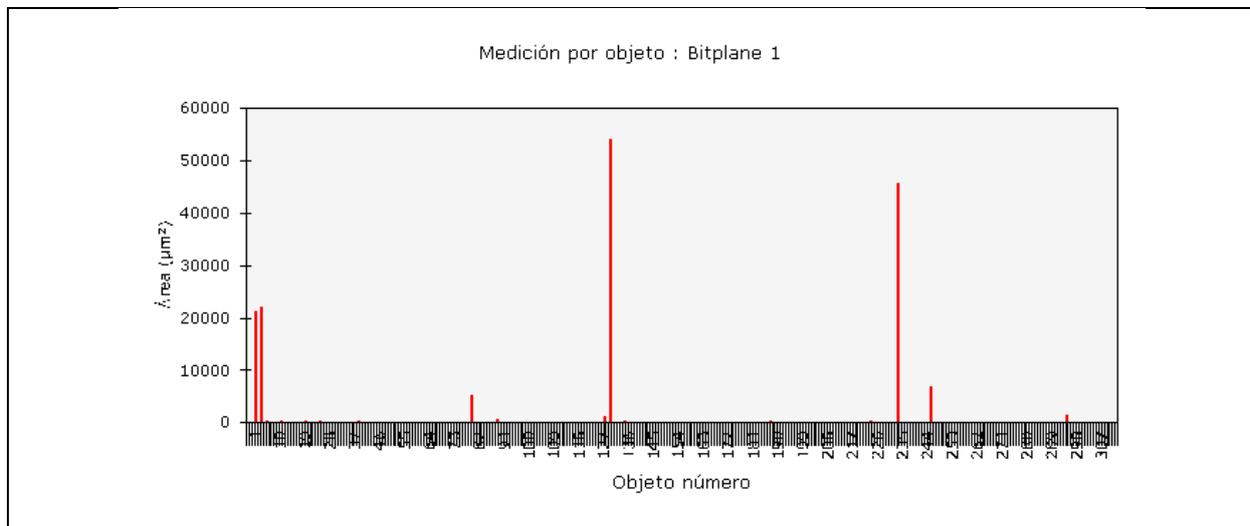
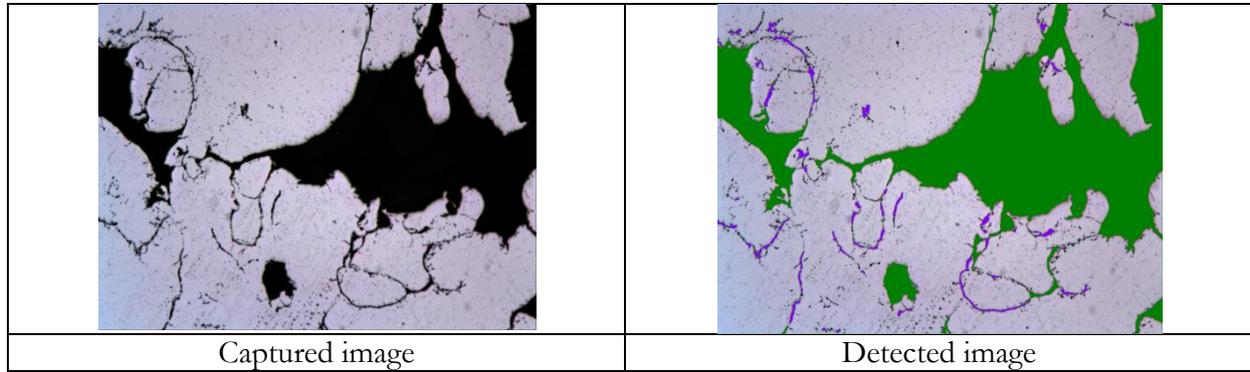
Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 μm/pixel
Date:	2012-06-14	Magnification:	100x



Measurement name:	Medición de campo	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	25,6243 %	Std dev:	1,0390 %
Total:	76,8728 %	95% CI:	2,58 %
Min:	24,4309 %	% RA:	10,07 %
Max:	26,9633 %	No fields of view:	3
Data points:	3	Total area analyzed:	664692,28 μm ²

Bicapa Austenítica [½-½] (550 MPa)
Capa 316L [300-500 μm] [½] – Área de los poros

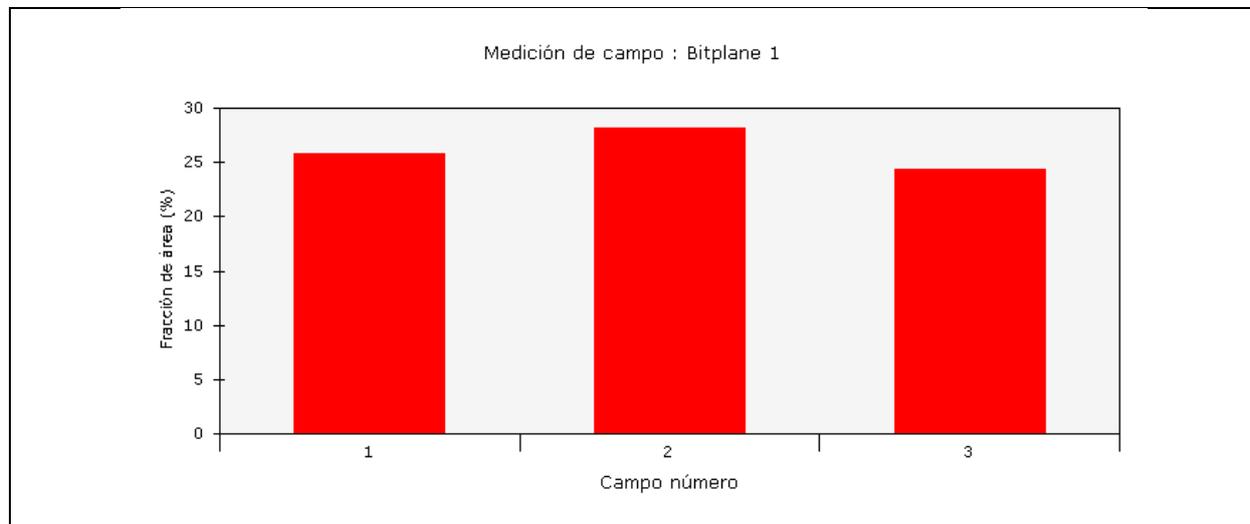
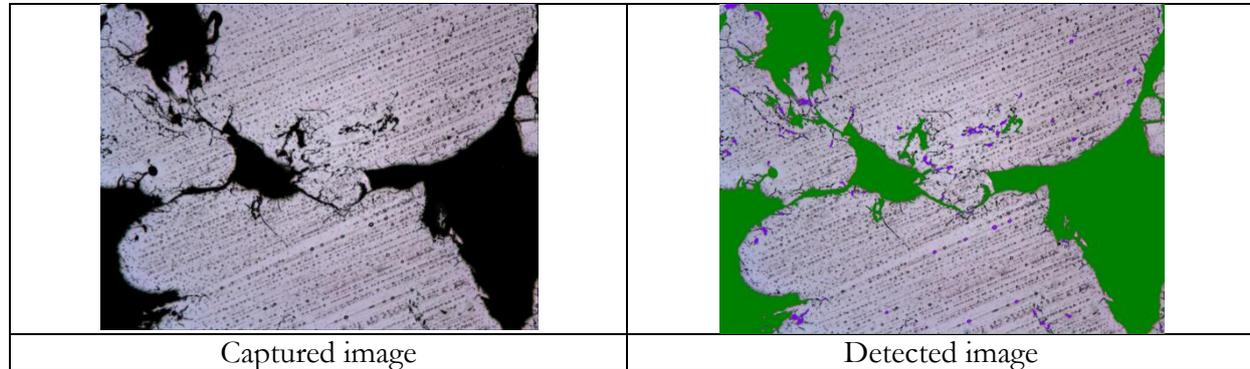
Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 μm/pixel
Date:	2012-06-14	Magnification:	100x



Measurement name:	Medición por objeto	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	540,7066 μm ²	Std dev:	4335,1404 μm ²
Total:	170322,5790 μm ²	95% CI:	10769,96 μm ²
Min:	4,5782 μm ²	% RA:	1991,83 μm ²
Max:	53924,1788 μm ²	No fields of view:	3
Data points:	315	Total area analyzed:	664692,28 μm ²

Bicapa Austenítica [½-½] (550 MPa) Capa 316L [500-710 μm] [½] - Porosidad superficial

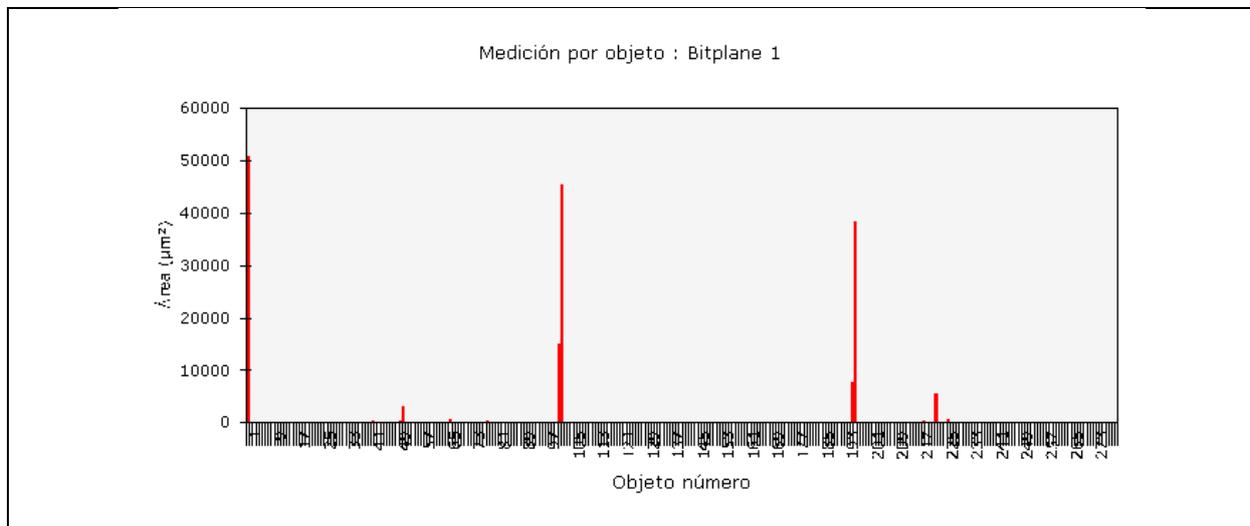
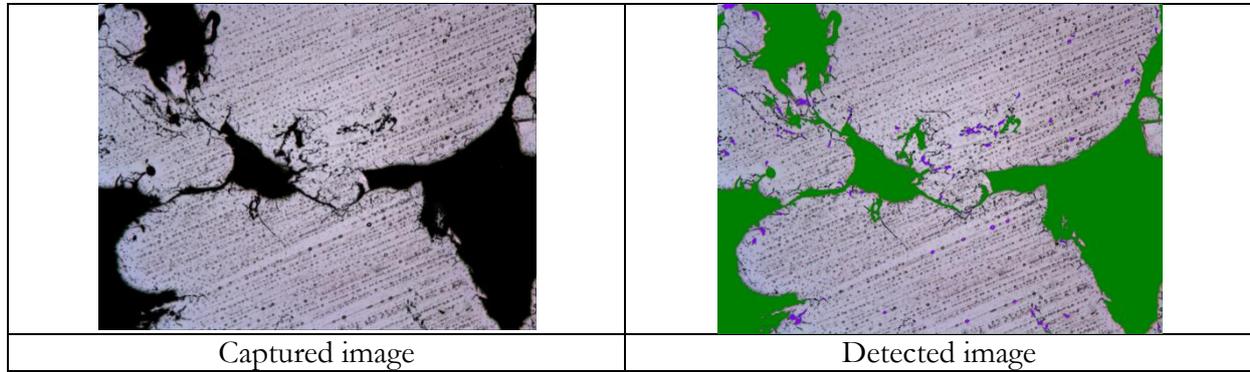
Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 μm/pixel
Date:	2012-06-14	Magnification:	100x



Measurement name:	Medición de campo	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	26,0743 %	Std dev:	1,5447 %
Total:	78,2229 %	95% CI:	3,84 %
Min:	24,3443 %	% RA:	14,72 %
Max:	28,0946 %	No fields of view:	3
Data points:	3	Total area analyzed:	664692,28 μm ²

Bicapa Austenítica [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (550 MPa) Capa 316L [500-710 μm] [$\frac{1}{2}$] – Área de los poros

Sample ID:		Calibration factor:	0,5308 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
Date:	2012-06-14	Magnification:	100x



Measurement name:	Medición por objeto	Bitplane(s):	Bitplane 1
Statistics			
Mean:	618,9779 μm^2	Std dev:	4749,0823 μm^2
Total:	173313,8120 μm^2	95% CI:	11798,33 μm^2
Min:	3,1695 μm^2	% RA:	1906,10 μm^2
Max:	50707,9817 μm^2	No fields of view:	3
Data points:	280	Total area analyzed:	664692,28 μm^2



Anexo 2

Caracterización microestructural: Micrografías

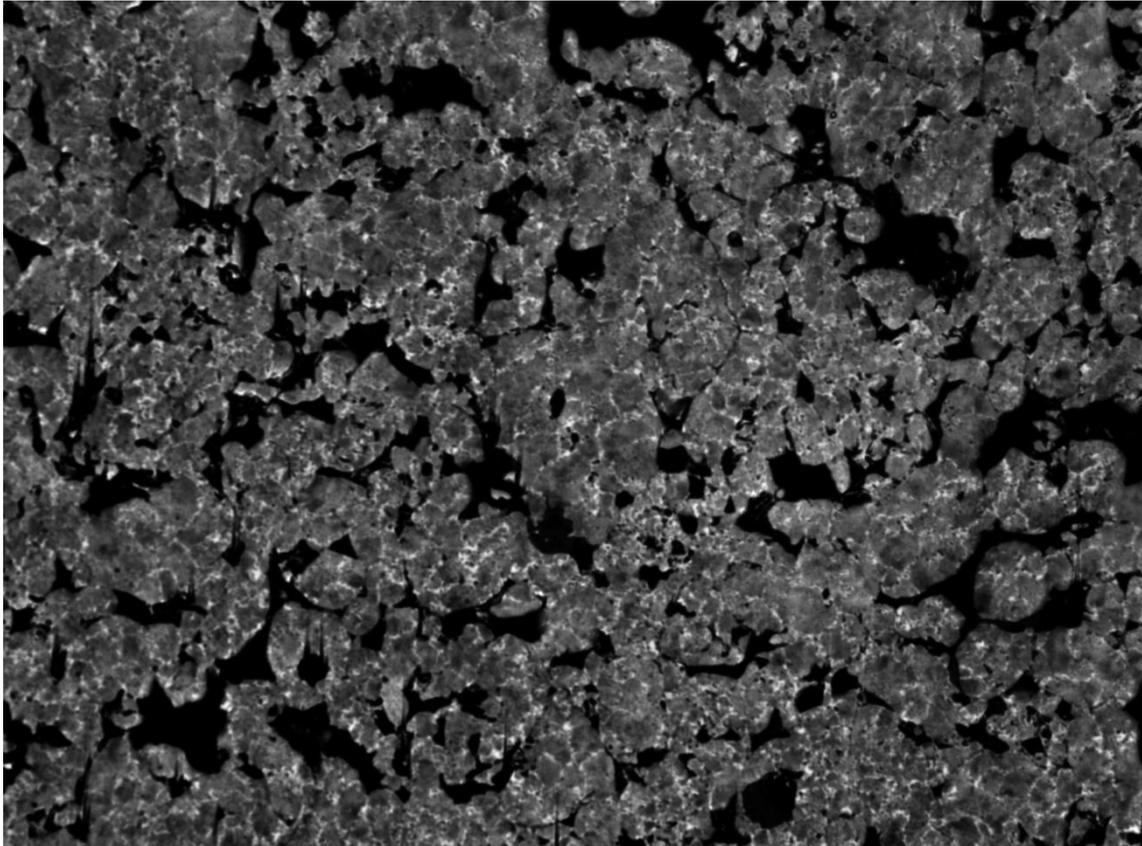


Universidad de Valladolid

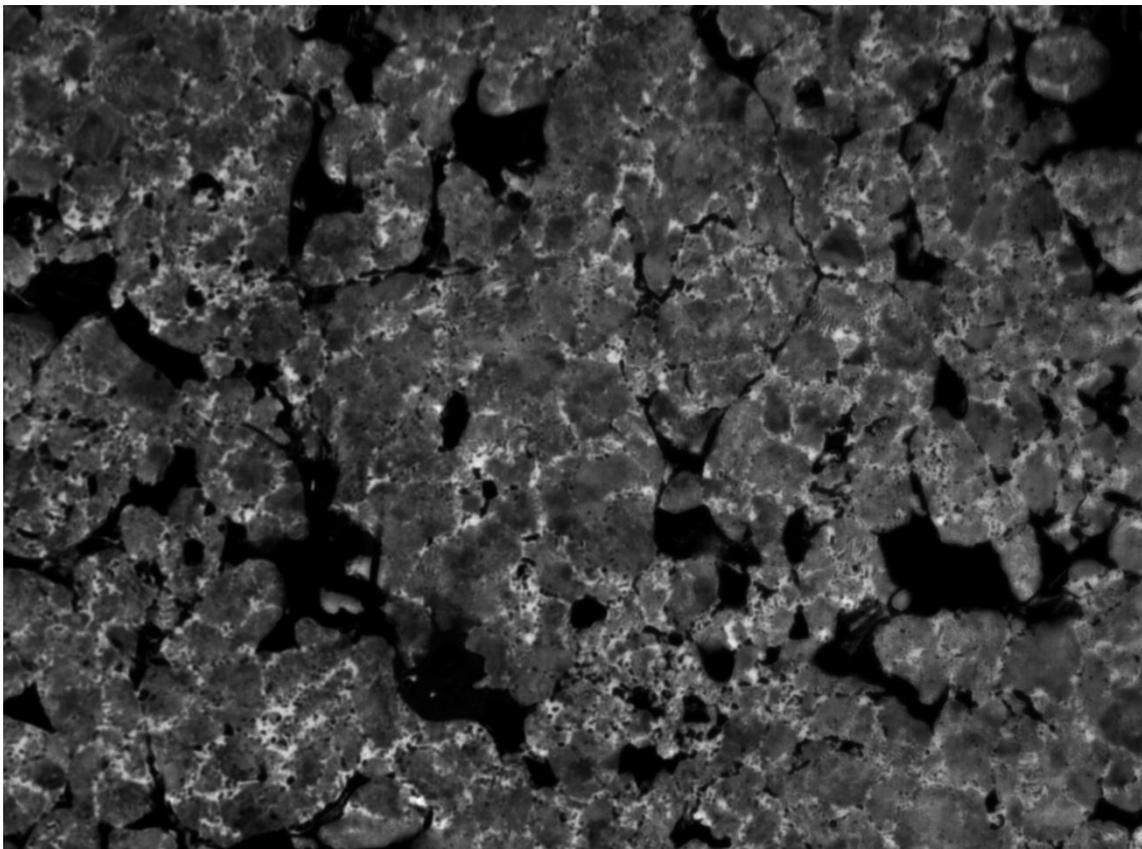


ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

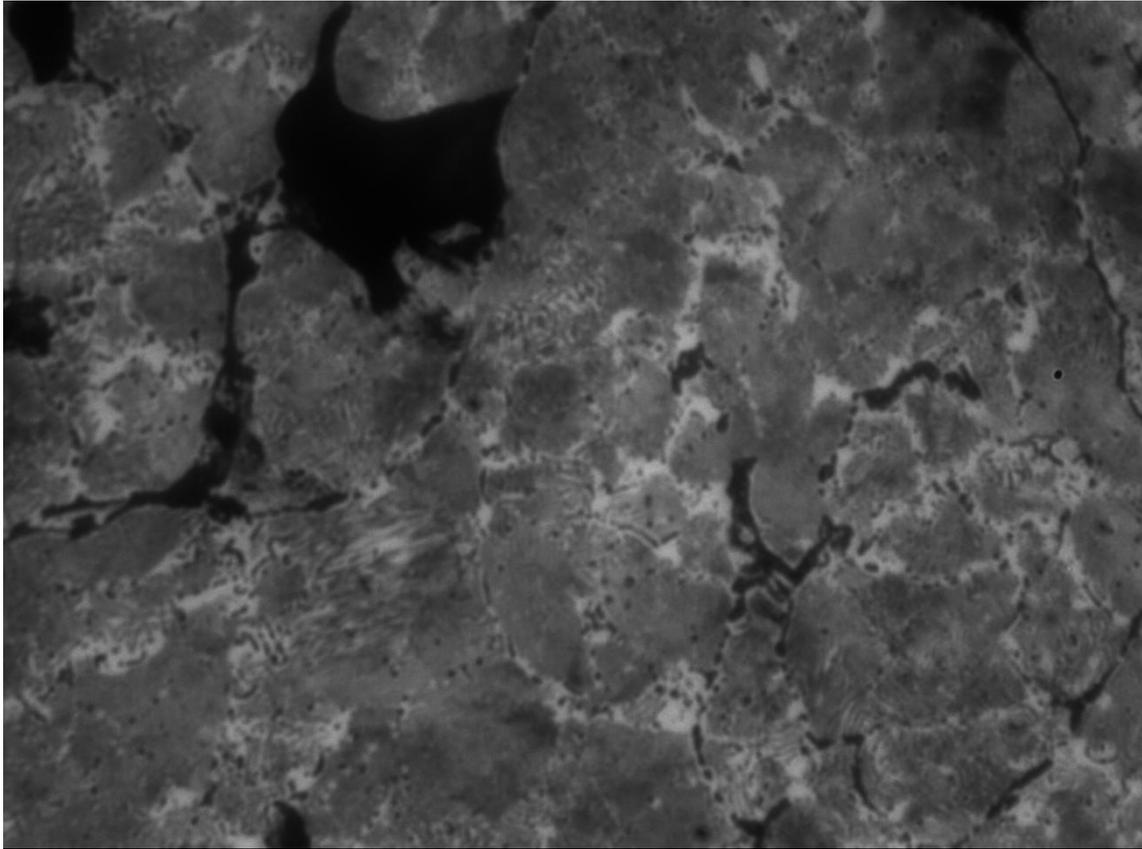
PROYECTO FIN DE CARRERA



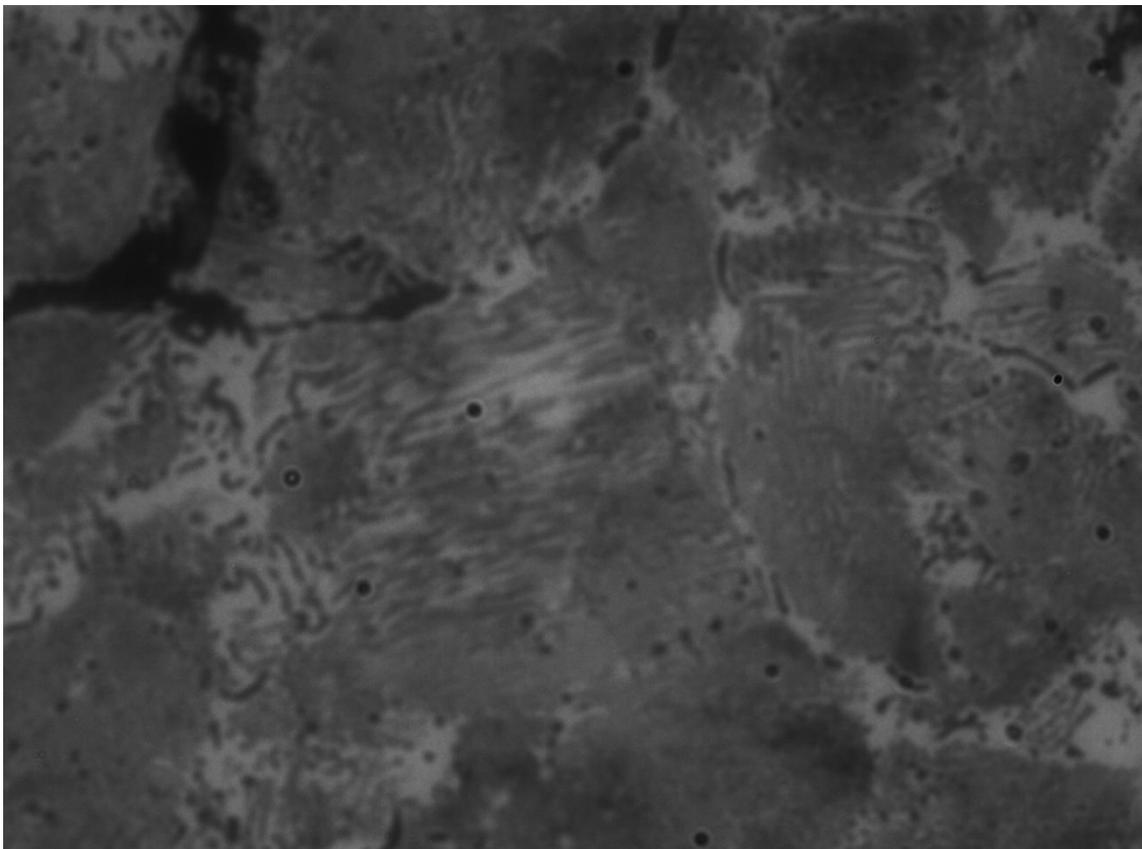
Micrografía nº 1: 430L (550 MPa) – 100 aumentos



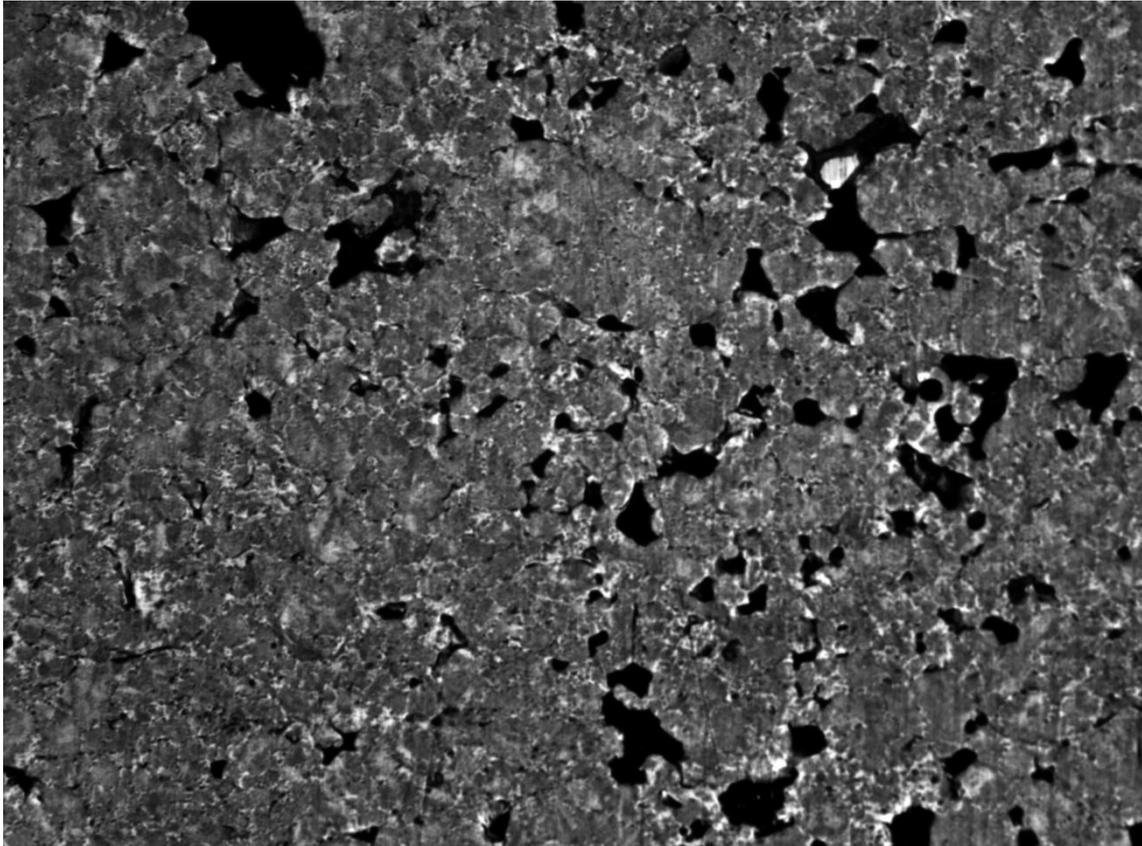
Micrografía nº 2: 430L (550 MPa) – 200 aumentos



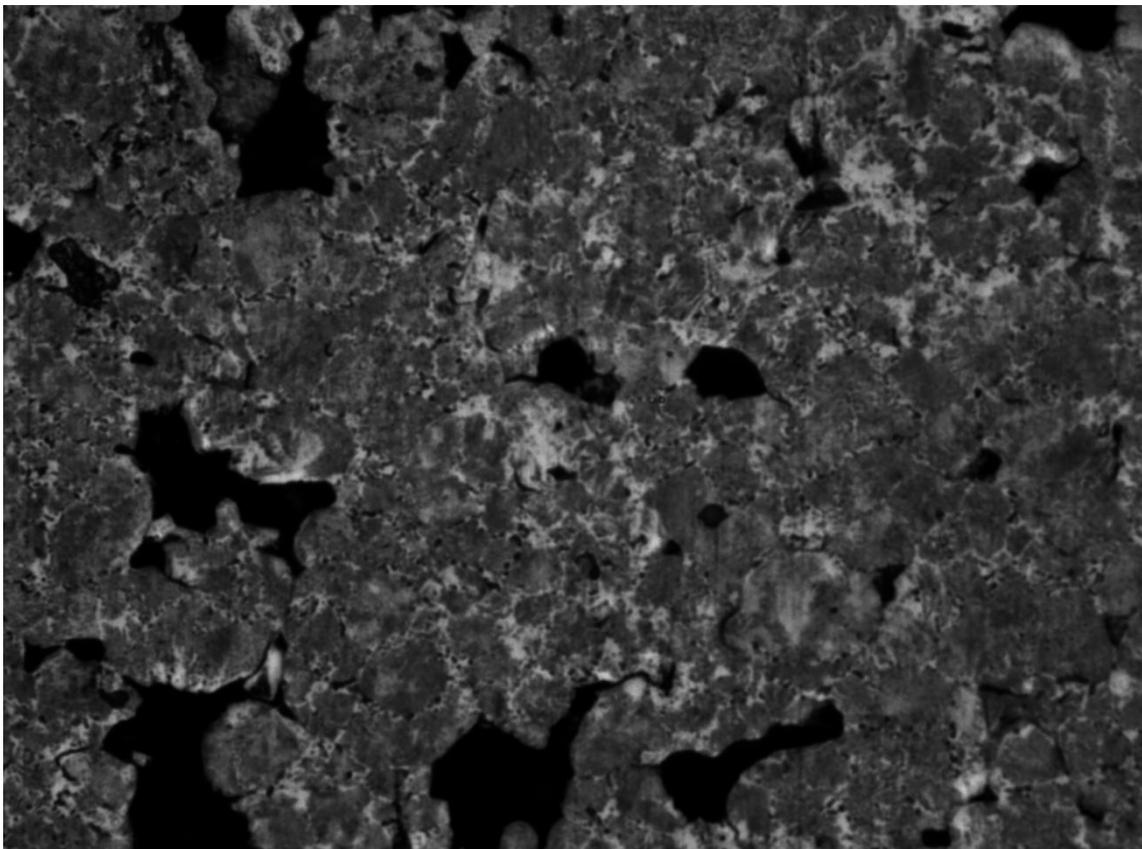
Micrografía nº 3: 430L (550 MPa) – 500 aumentos



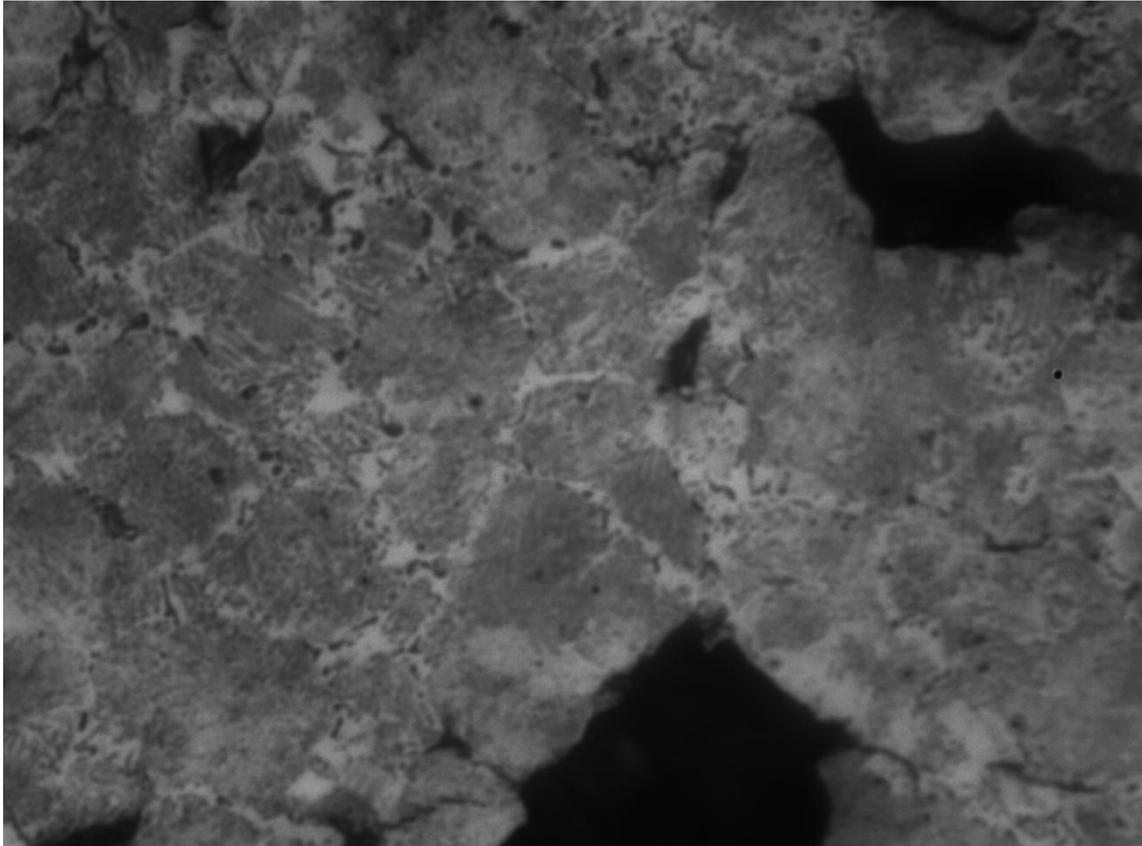
Micrografía nº 4: 430L (550 MPa) – 1000 aumentos



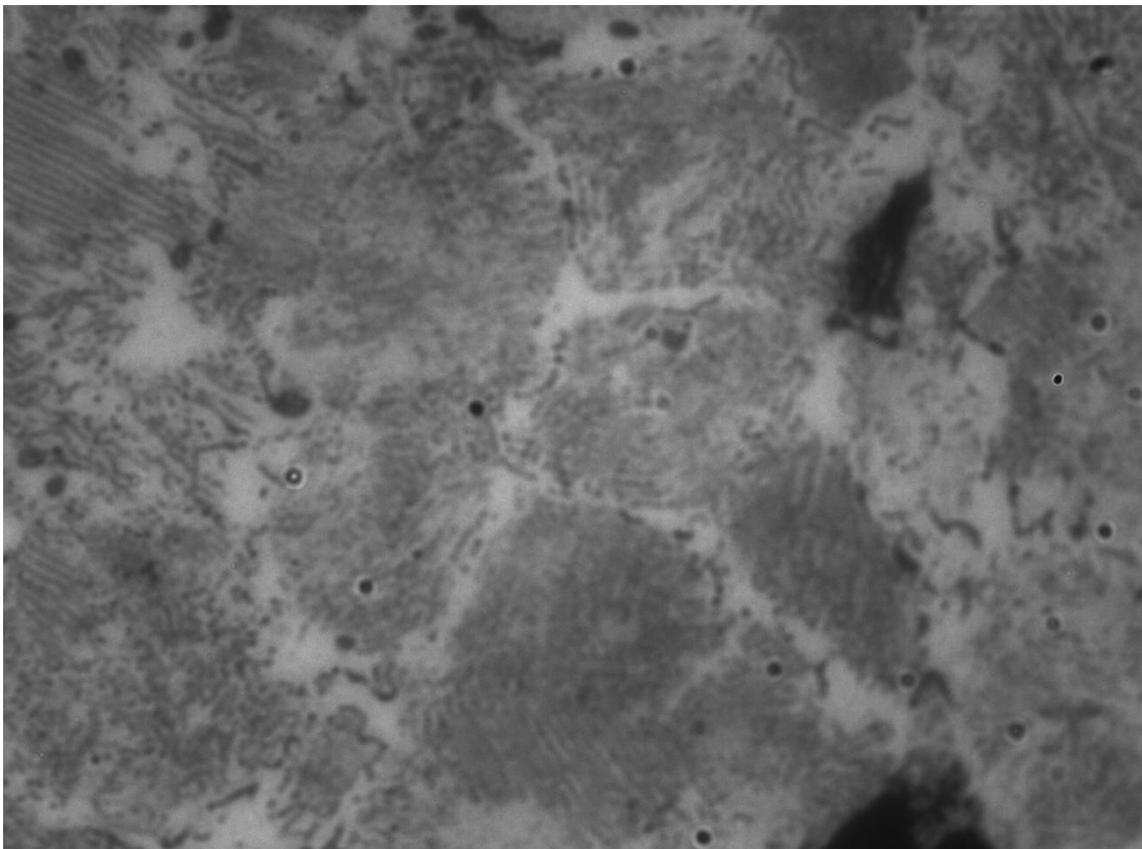
Micrografía nº 5: 430L (750 MPa) – 100 aumentos



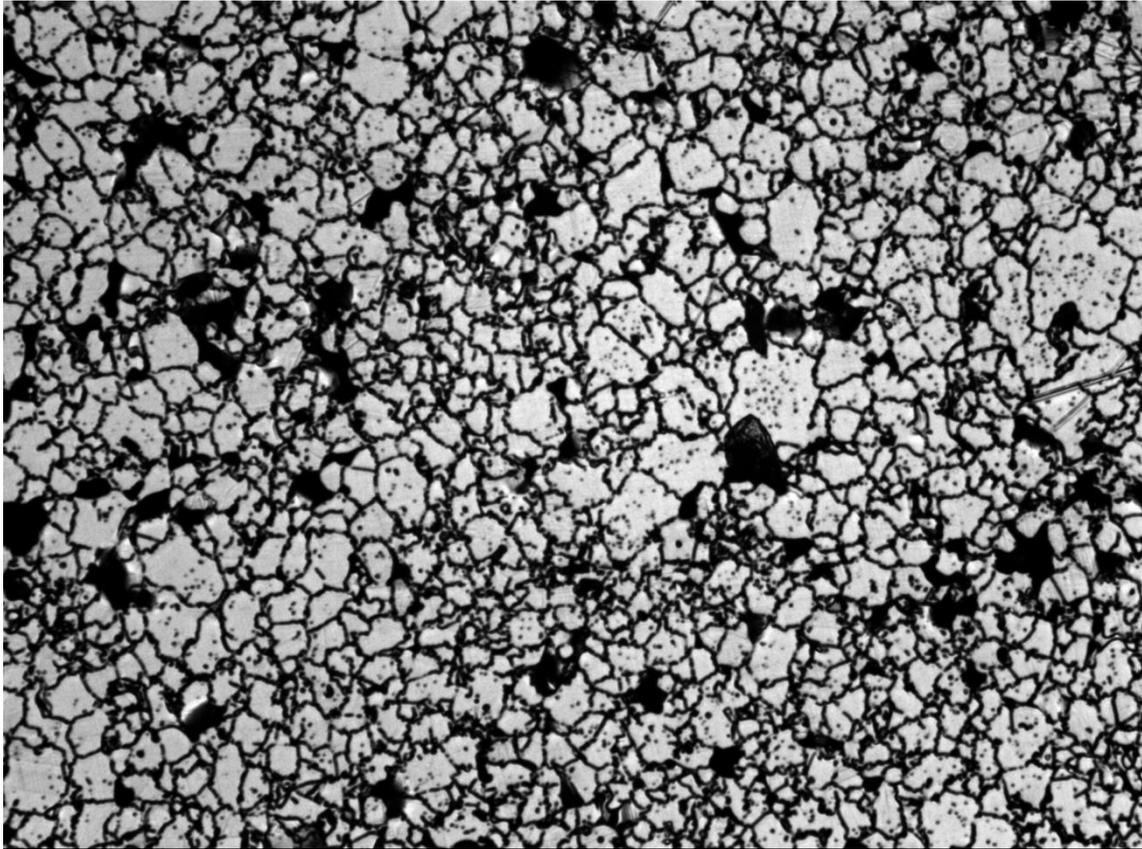
Micrografía nº 6: 430L (750 MPa) – 200 aumentos



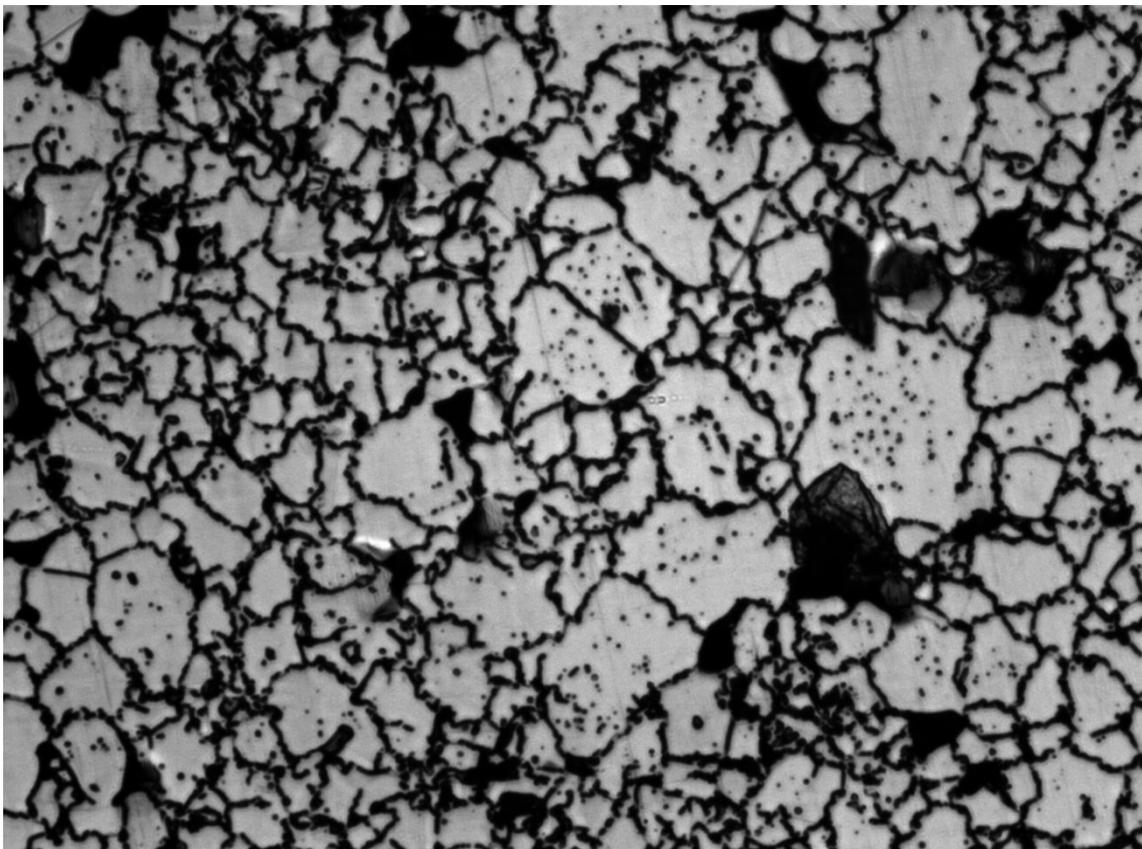
Micrografía nº 7: 430L (750 MPa) – 500 aumentos



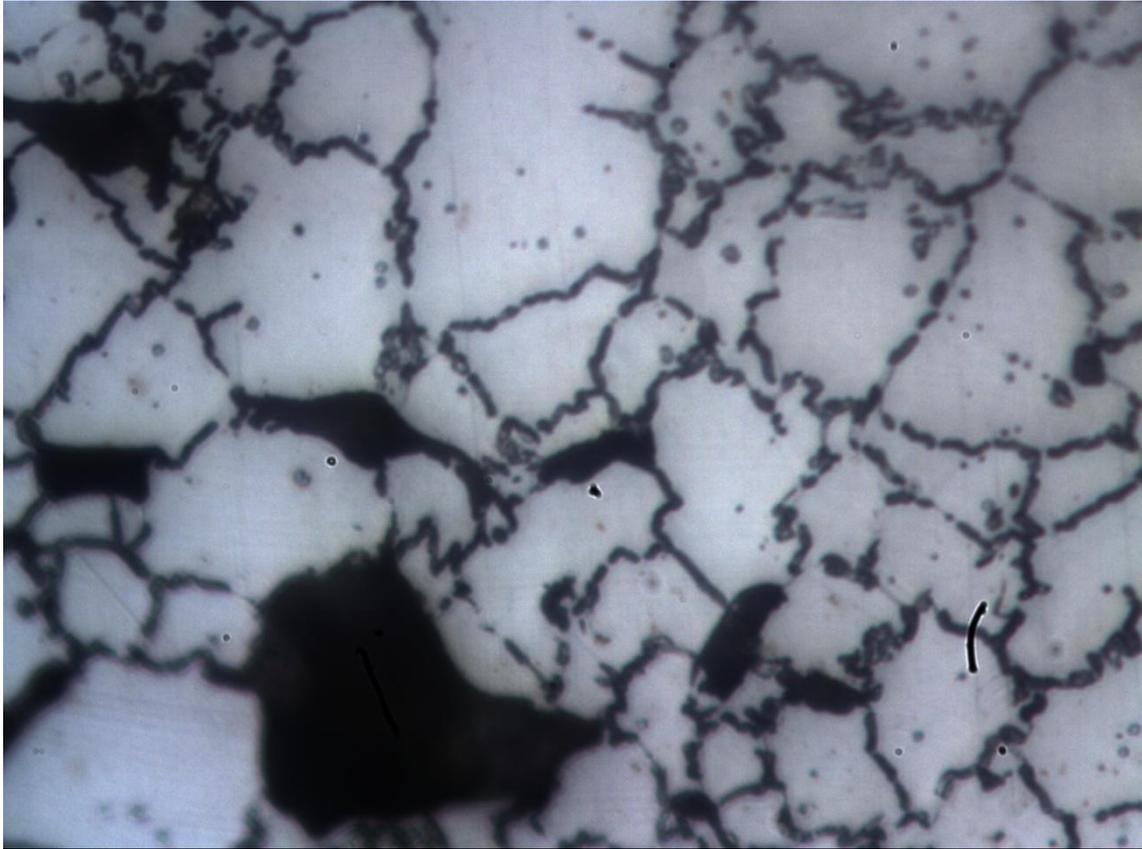
Micrografía nº 8: 430L (750 MPa) – 1000 aumentos



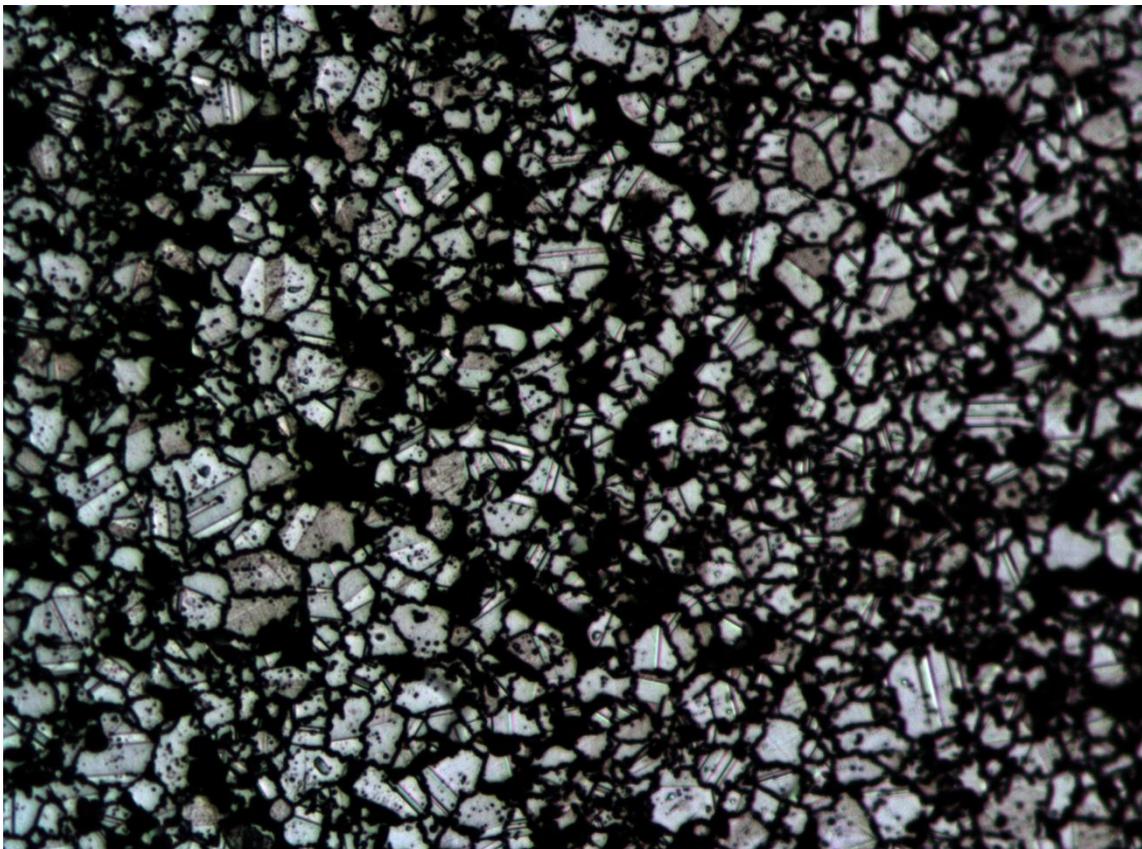
Micrografía nº 9: 316L (750 MPa) – 100 aumentos



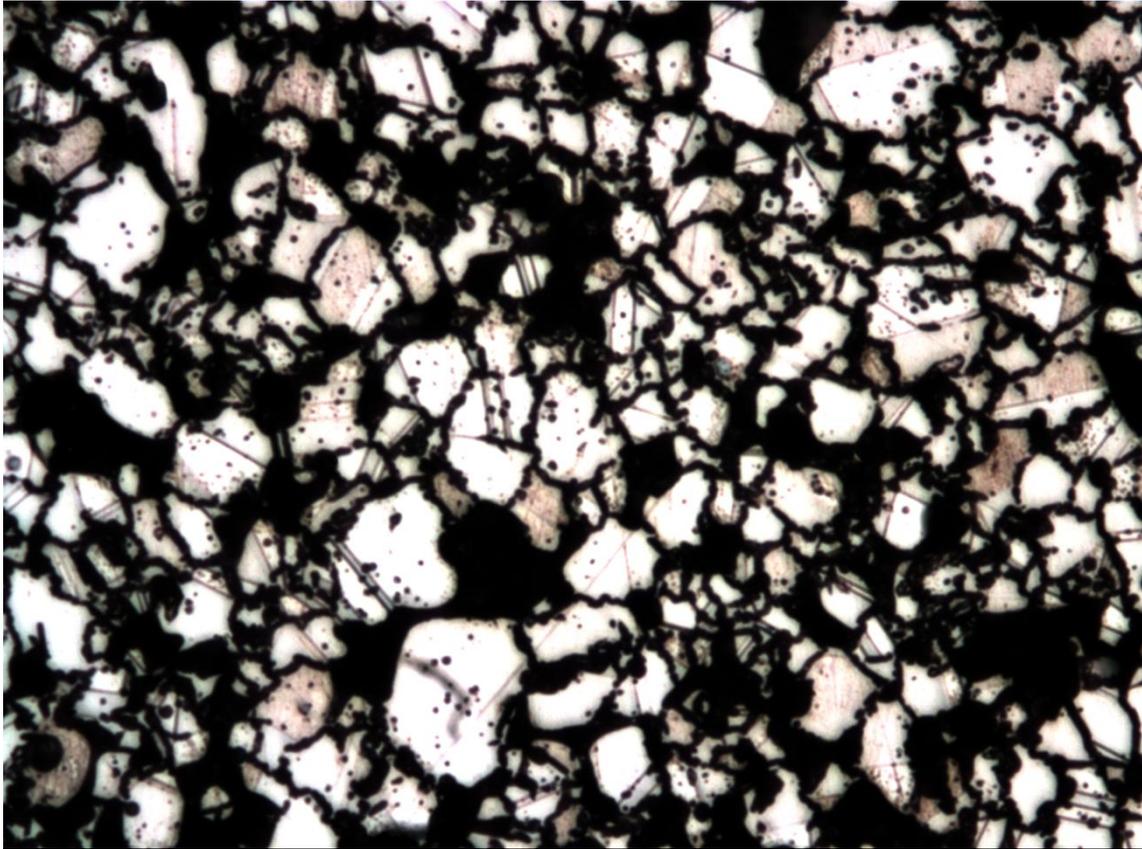
Micrografía nº 10: 316L (750 MPa) – 200 aumentos



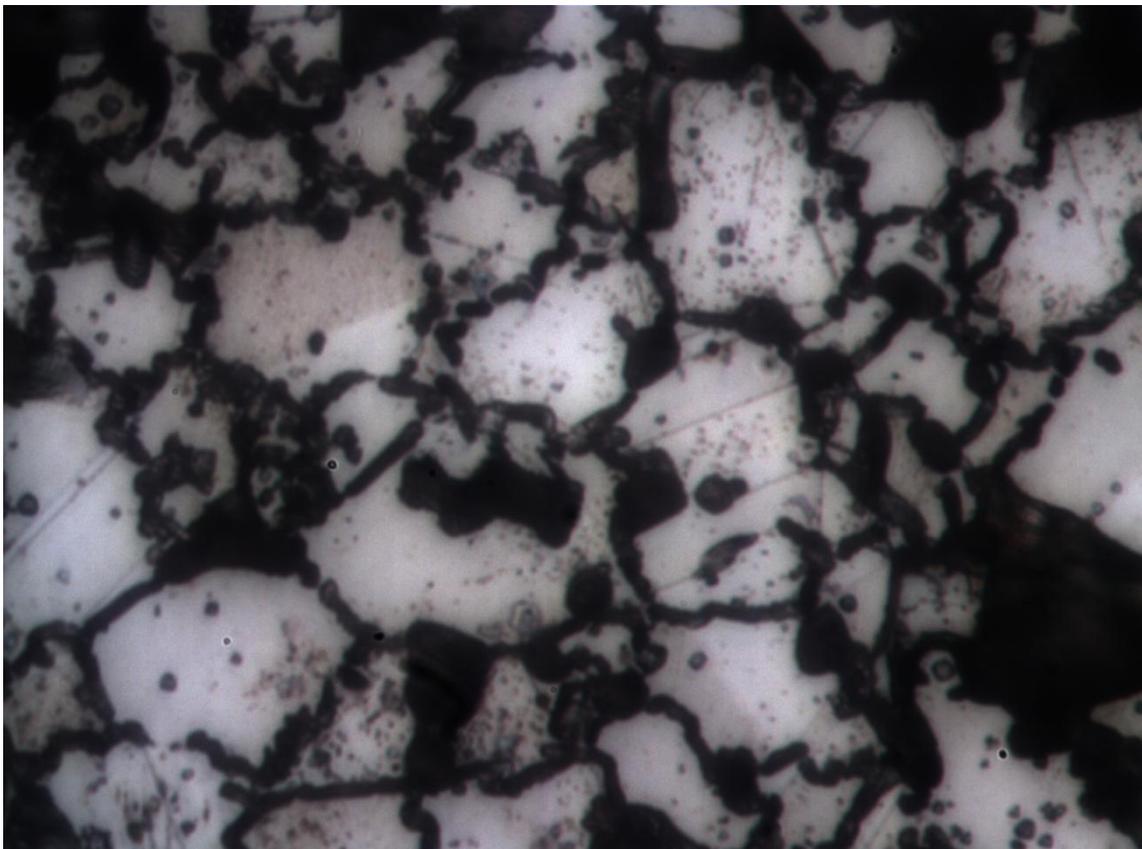
Micrografía nº 11: 316L (750 MPa) – 500 aumentos



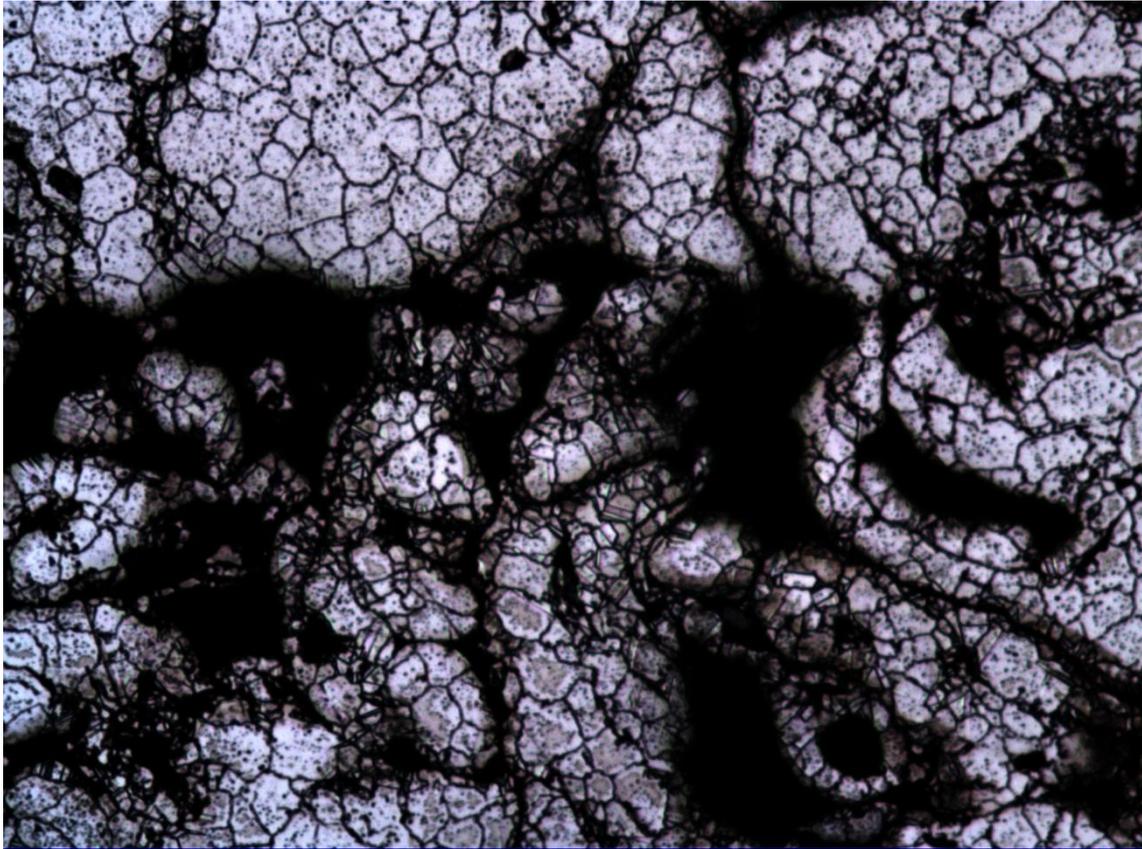
Micrografía nº 12: 316L (550 MPa) – 100 aumentos



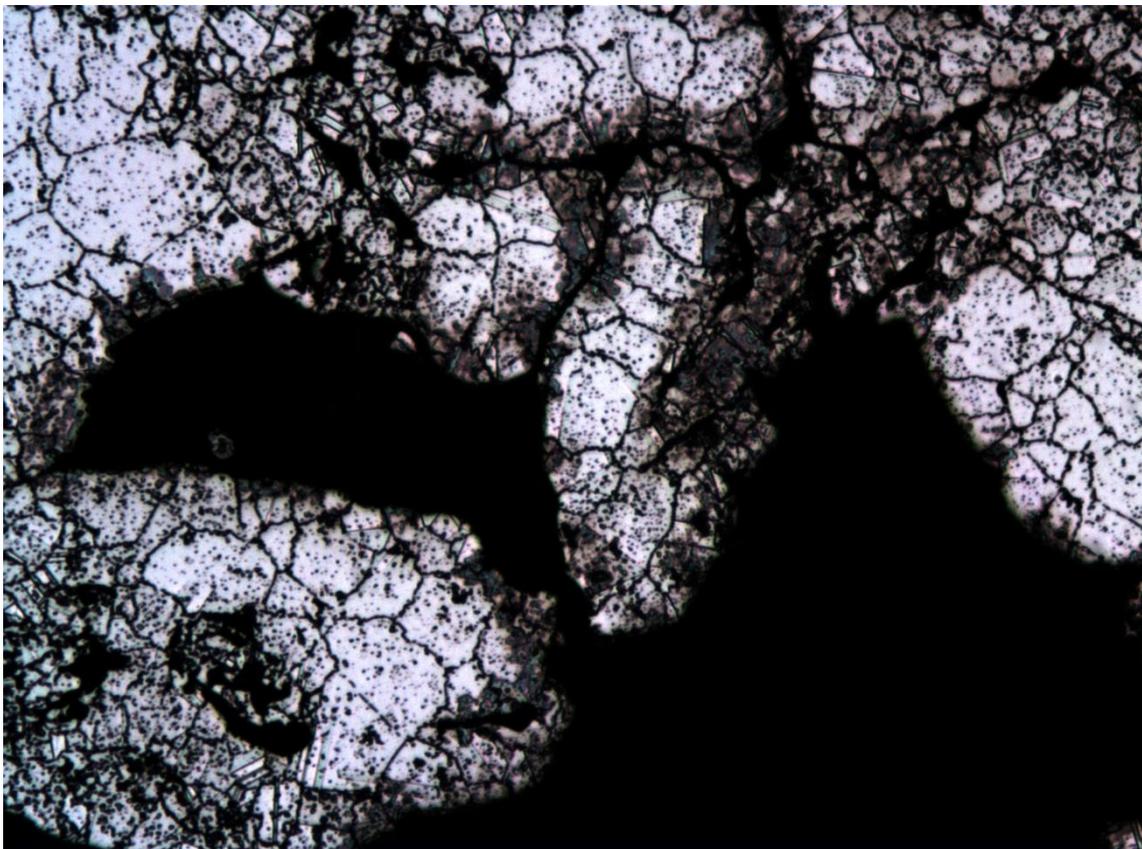
Micrografía nº 13: 316L (550 MPa) – 200 aumentos



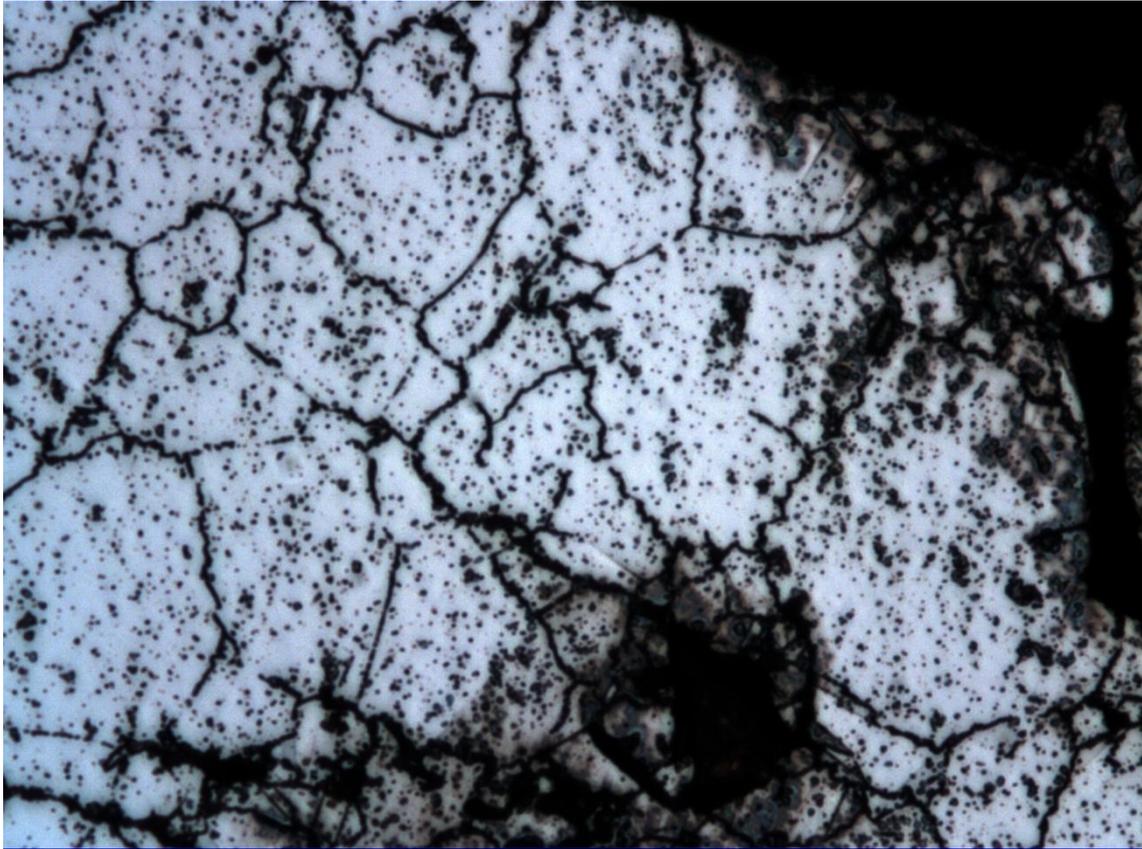
Micrografía nº 14: 316L (550 MPa) – 500 aumentos



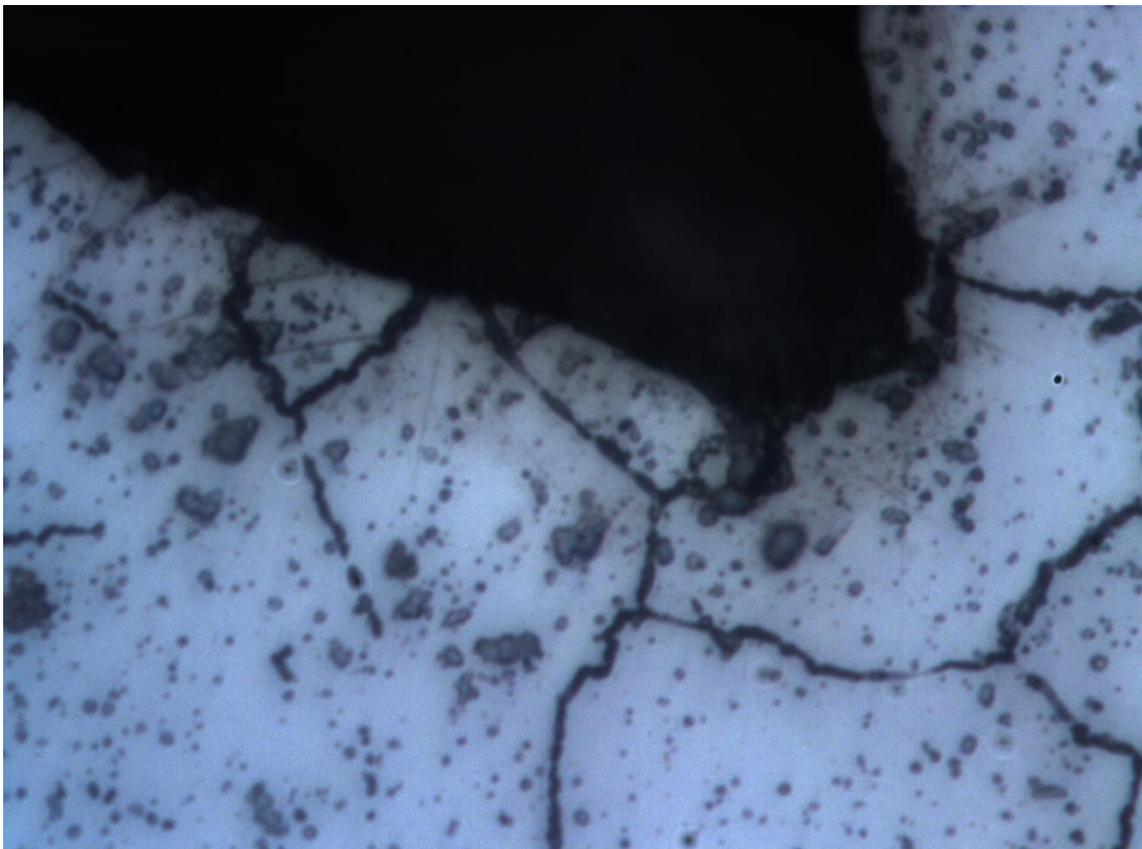
Micrografía nº 15: 316L [500-710 μm] (750 MPa) – 50 aumentos



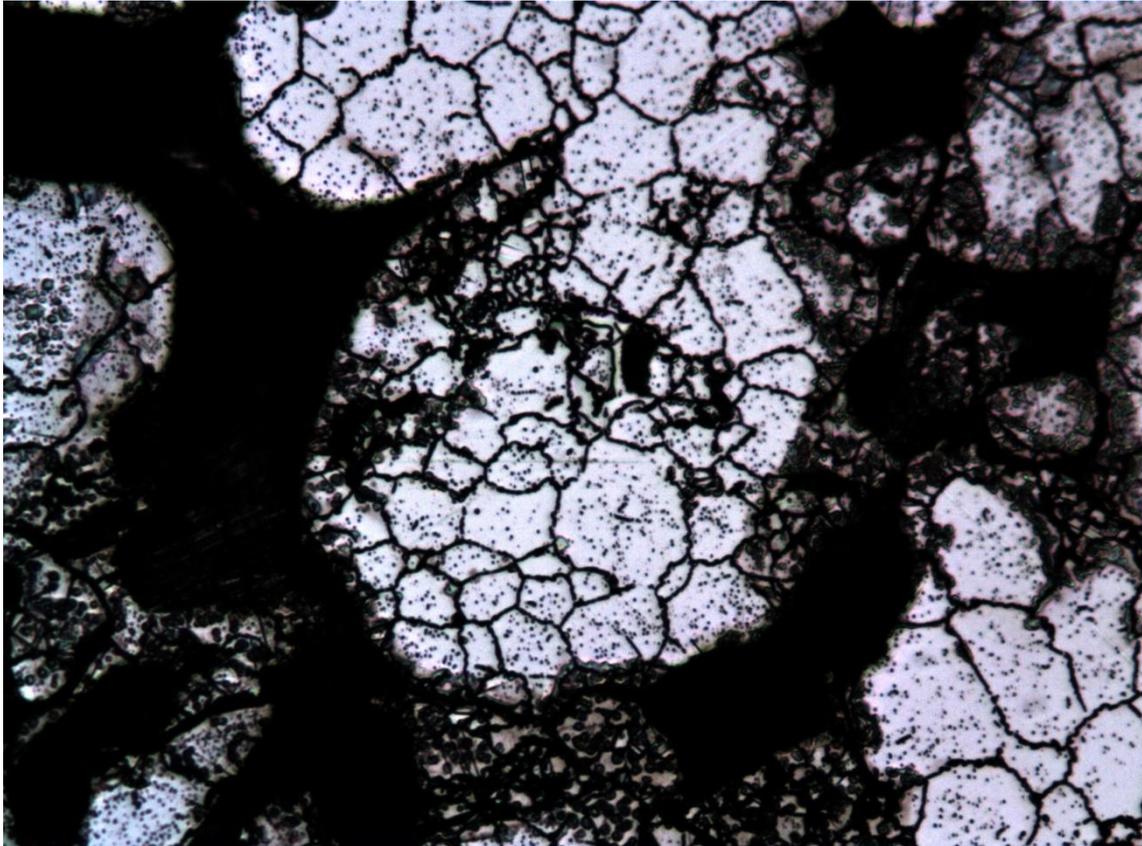
Micrografía nº 16: 316L [500-710 μm] (750 MPa) – 100 aumentos



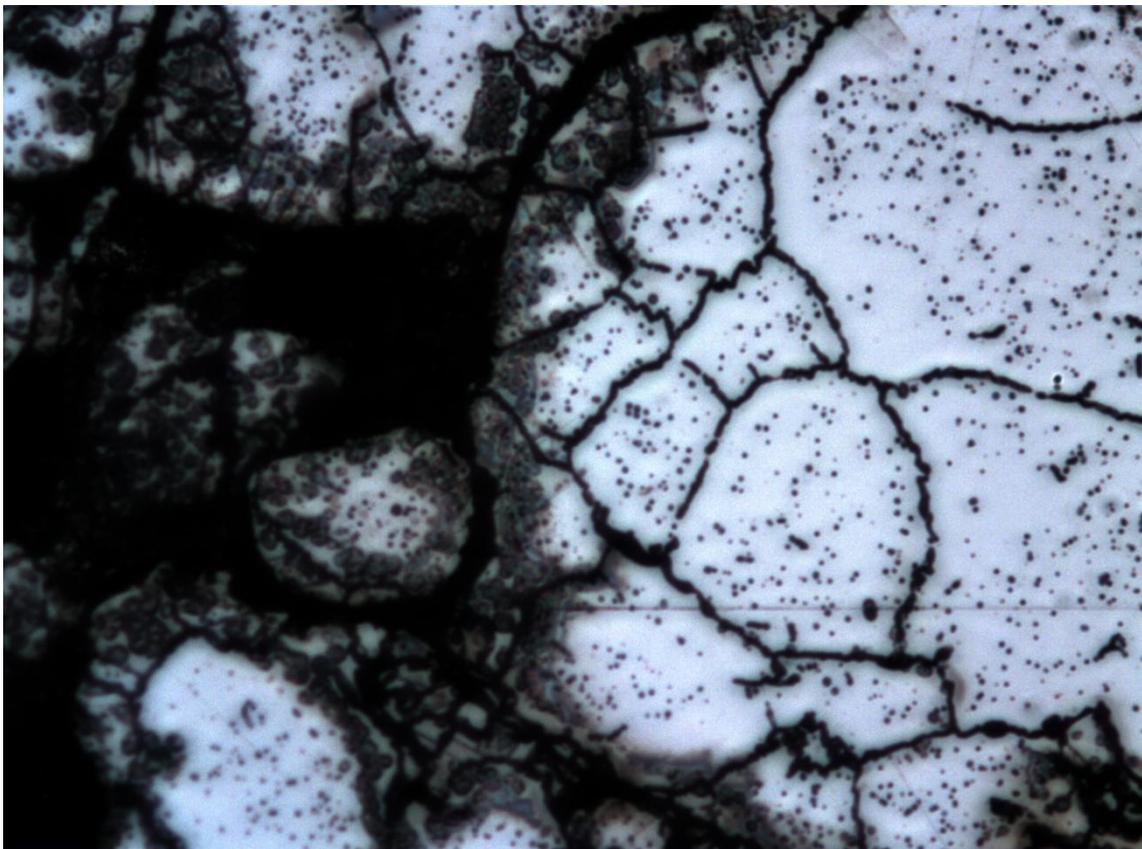
Micrografía nº 17: 316L [500-710 μm] (750 MPa) – 200 aumentos



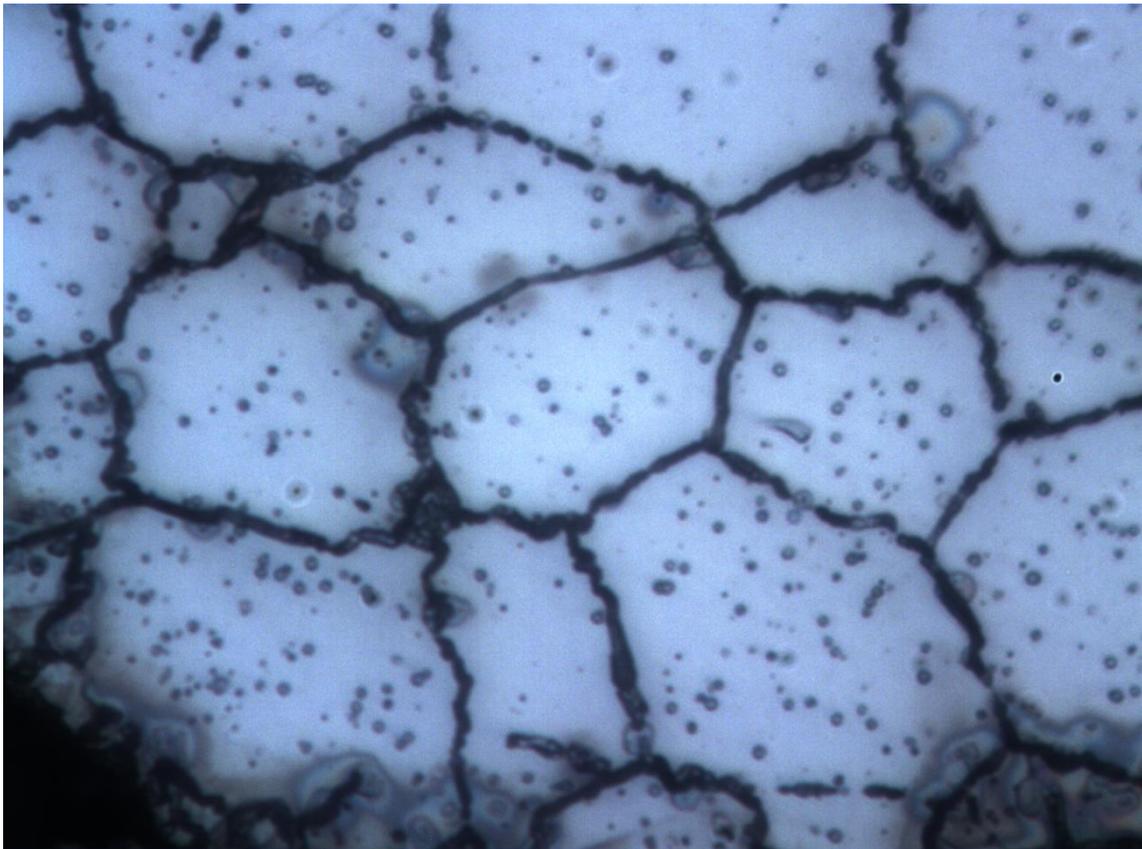
Micrografía nº 18: 316L [500-710 μm] (750 MPa) – 500 aumentos



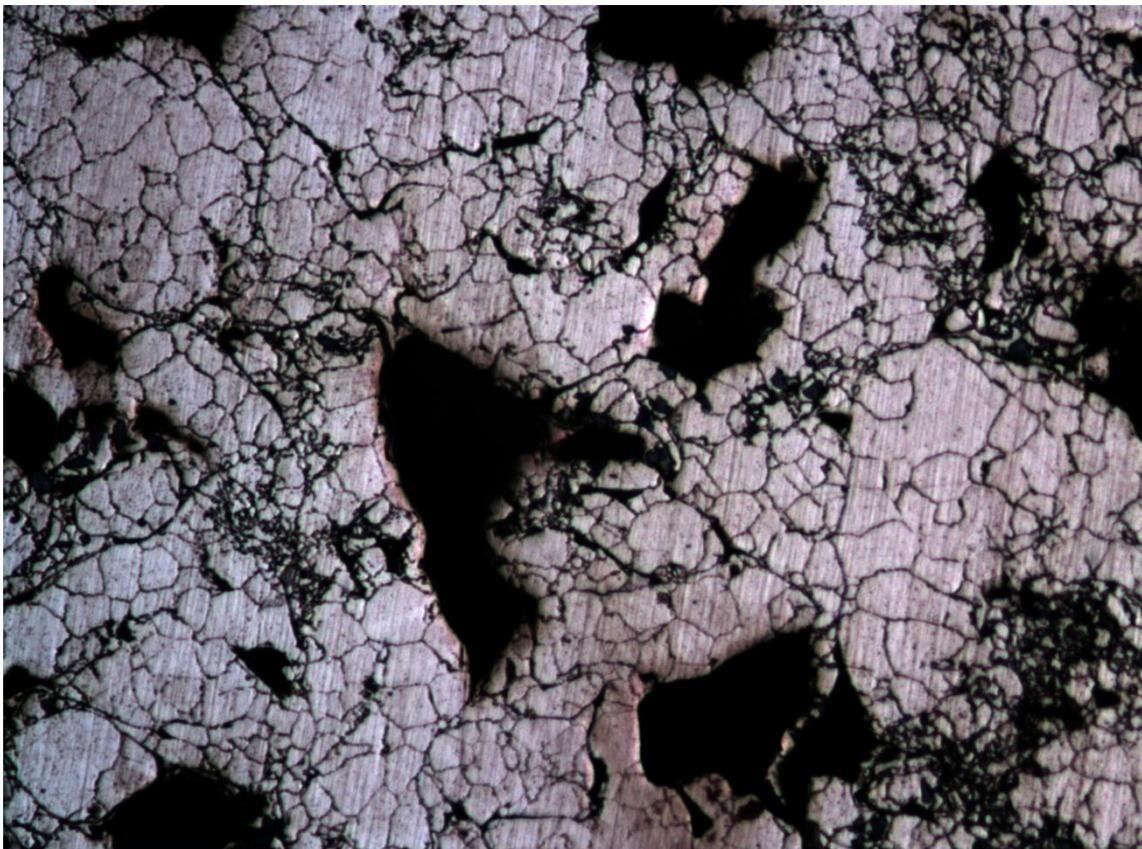
Micrografía nº 19: 316L [500-710 μm] (550 MPa) – 100 aumentos



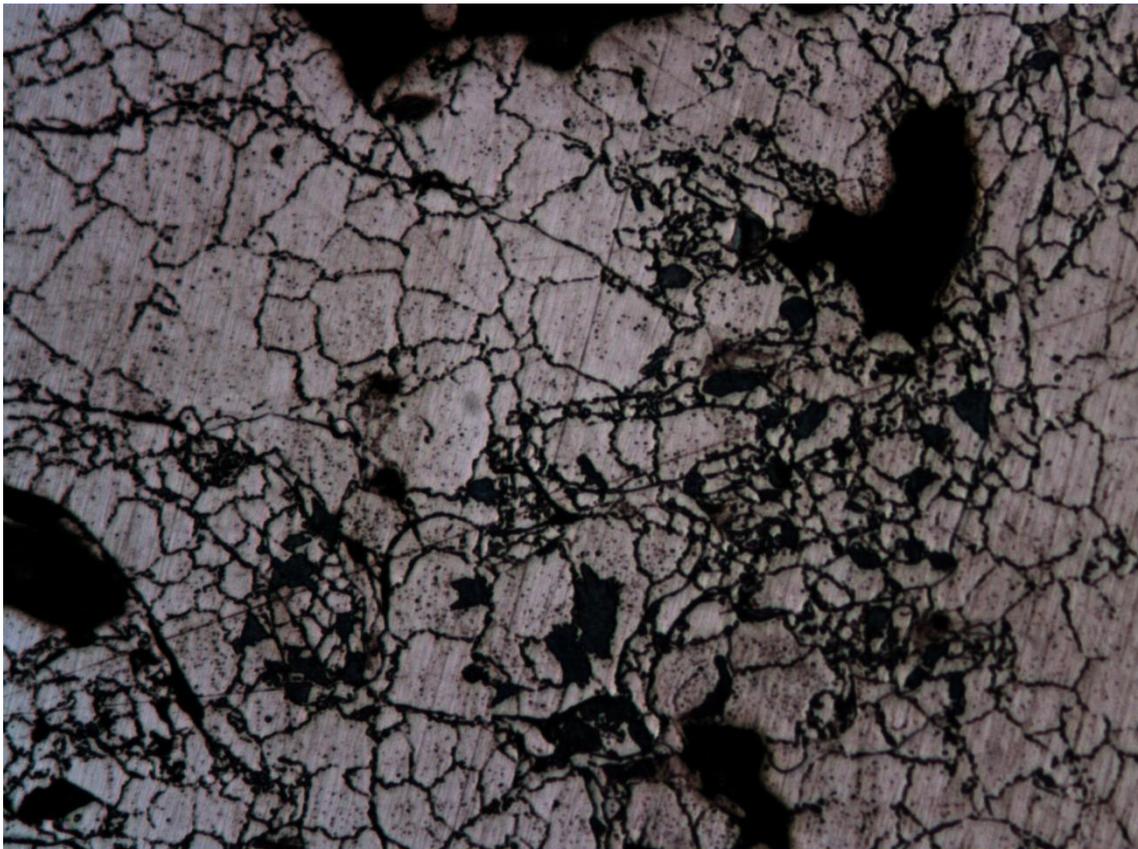
Micrografía nº 20: 316L [500-710 μm] (550 MPa) – 200 aumentos



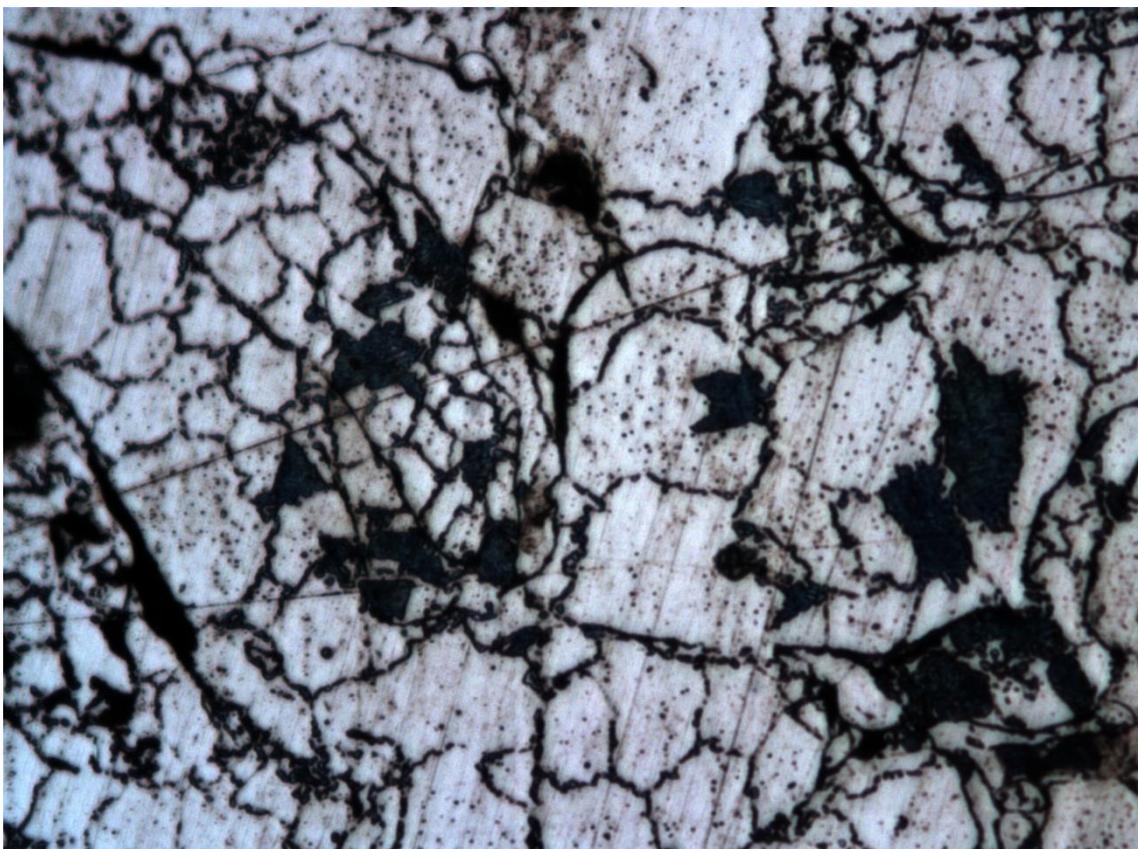
Micrografía nº 21: 316L [500-710 μm] (550 MPa) – 500 aumentos



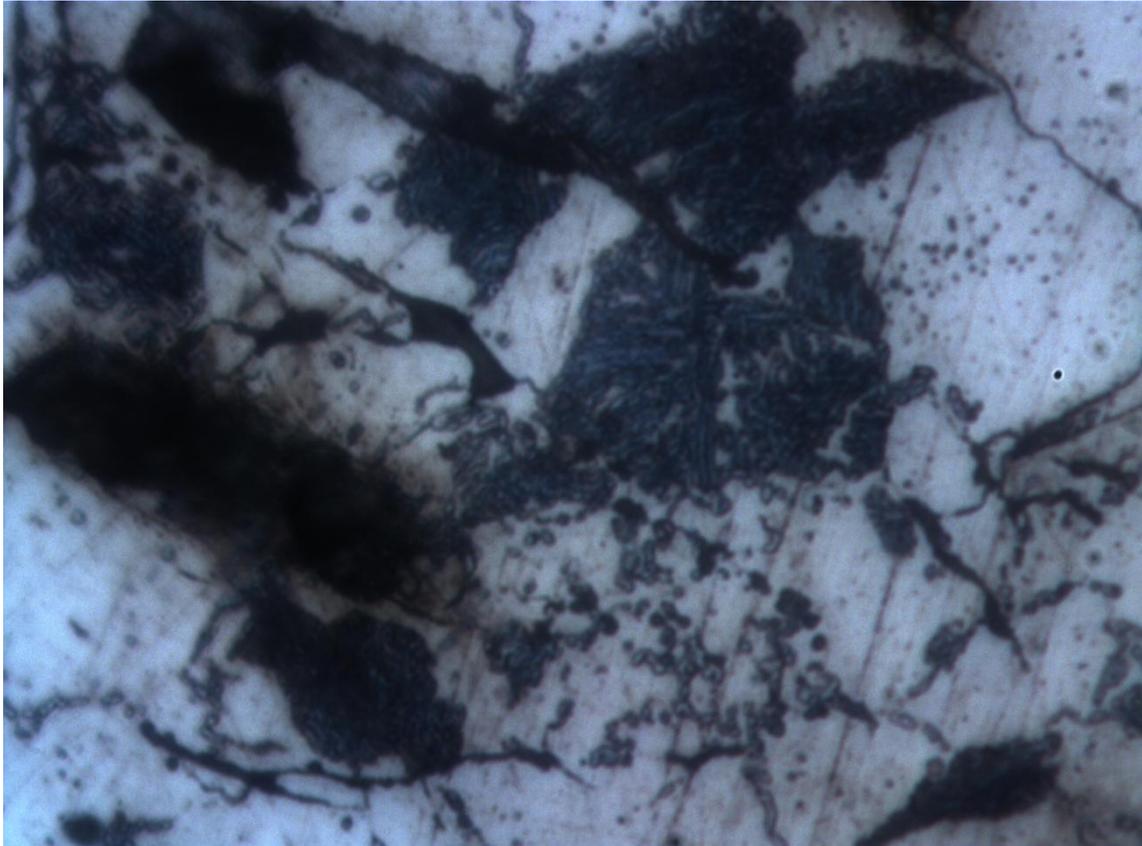
Micrografía nº 22: 316L [500-710 μm] (550 MPa) – 50 aumentos



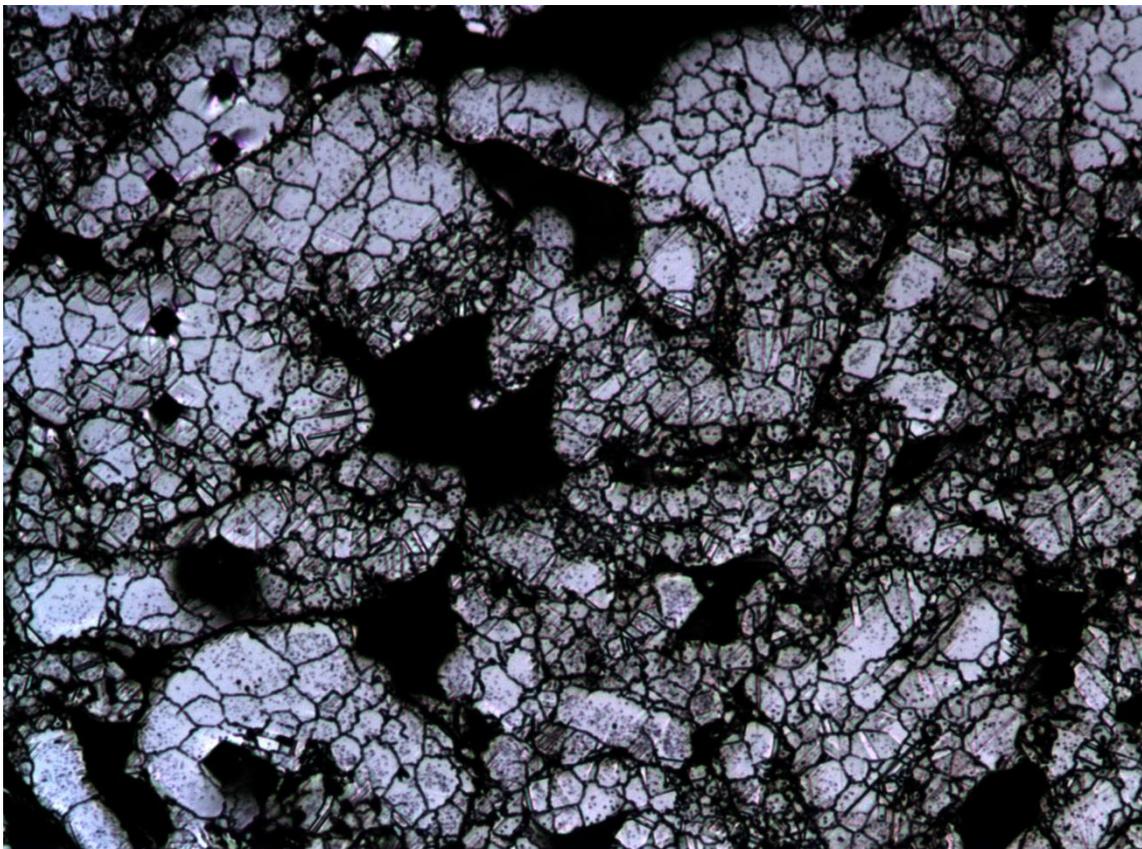
Micrografía nº 23: 316L [500-710 μm] (550 MPa) – 100 aumentos



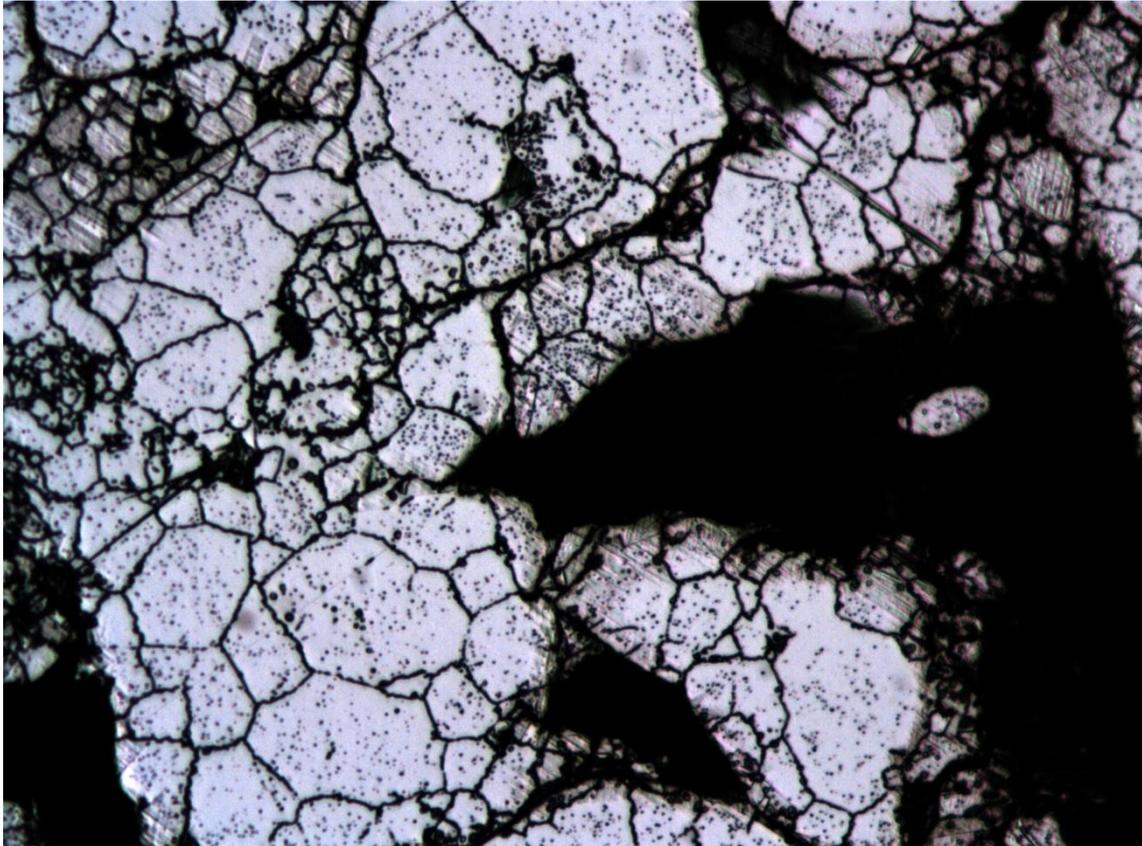
Micrografía nº 24: 316L [500-710 μm] (550 MPa) – 200 aumentos



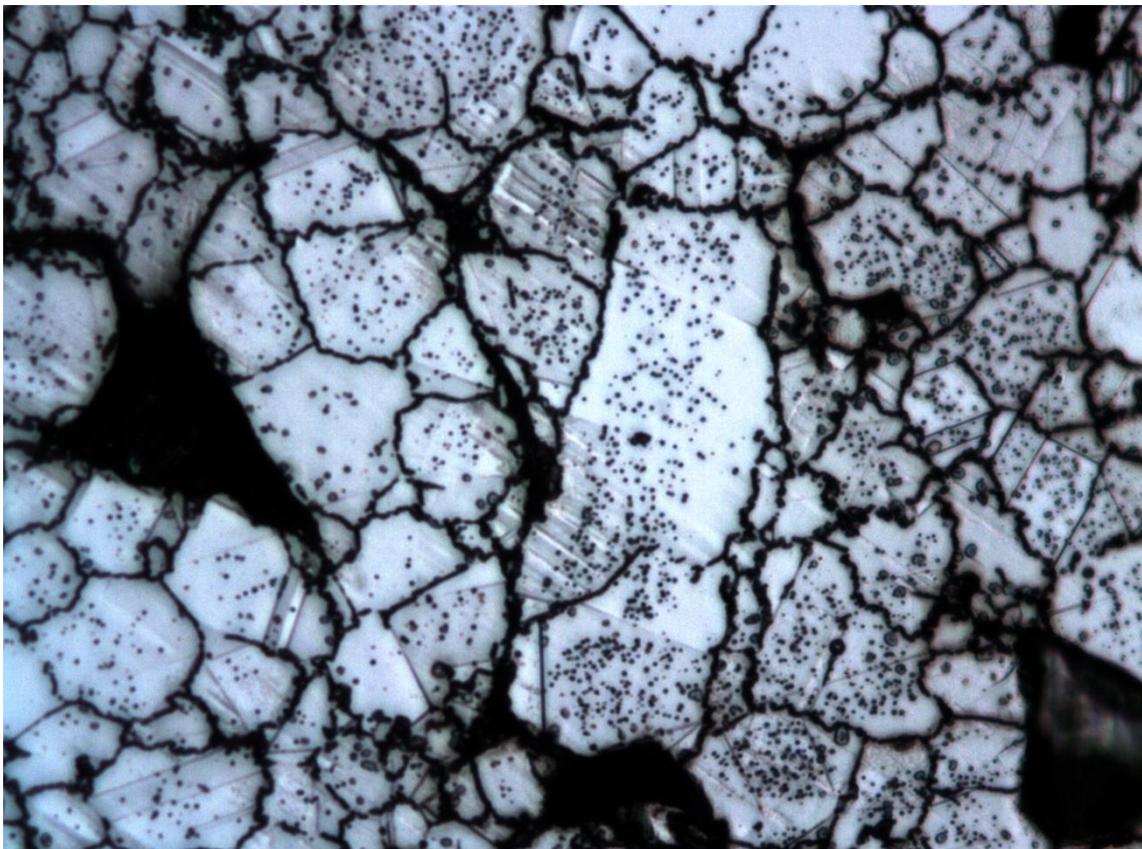
Micrografía nº 25: 316L [500-710 μm] (550 MPa) – 500 aumentos



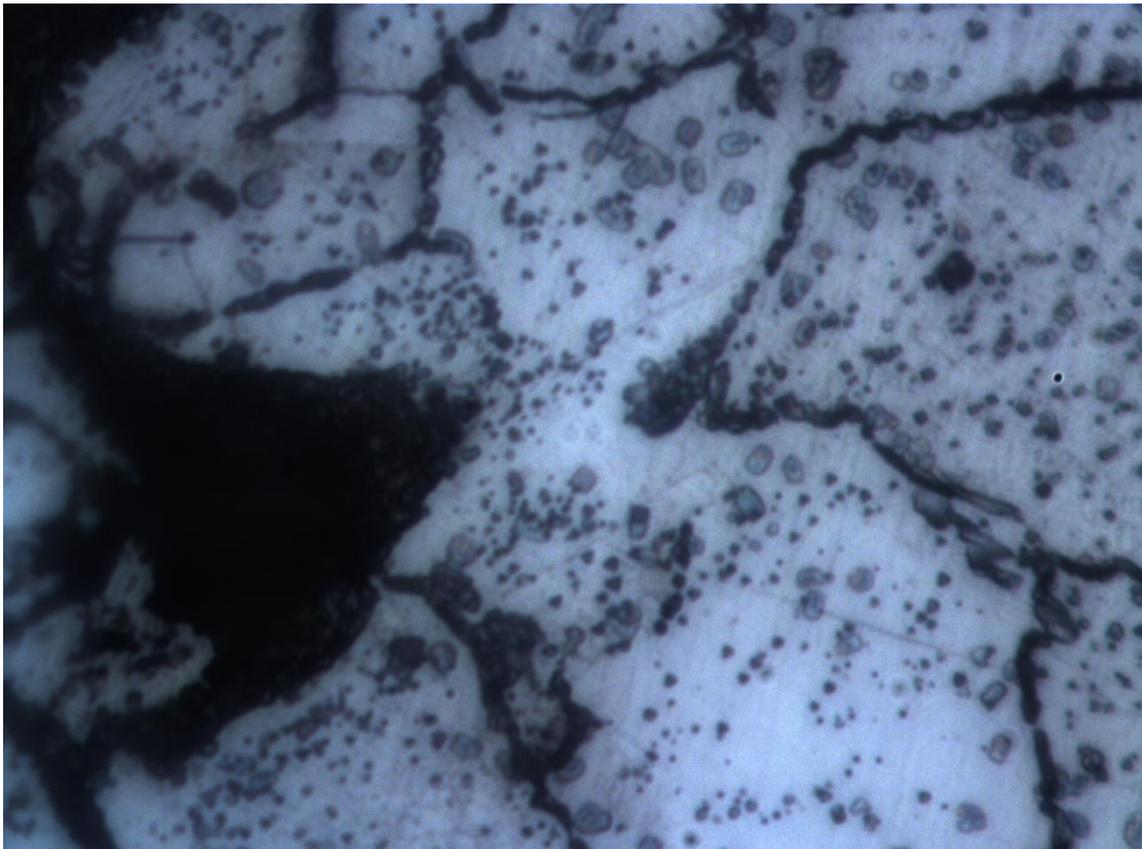
Micrografía nº 26: 316L [300-500 μm] (750 MPa) – 50 aumentos



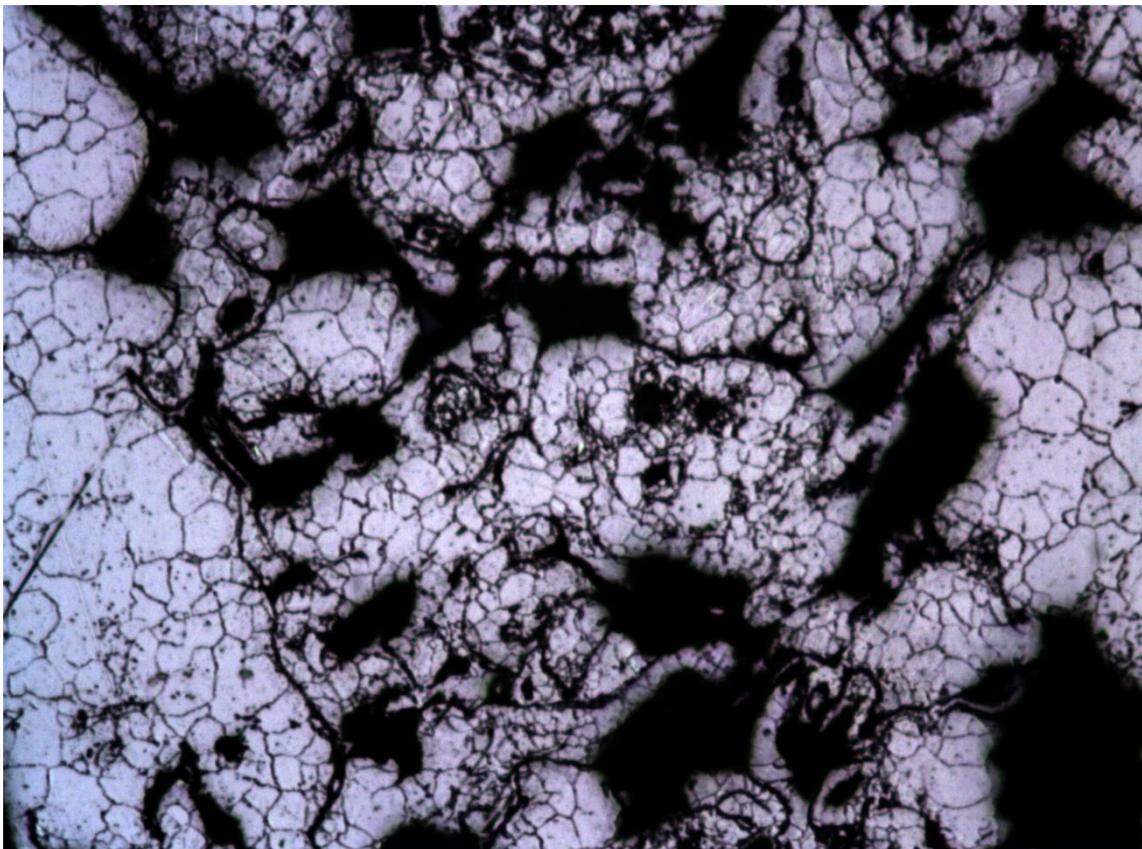
Micrografía nº 27: 316L [300-500 μm] (750 MPa) – 100 aumentos



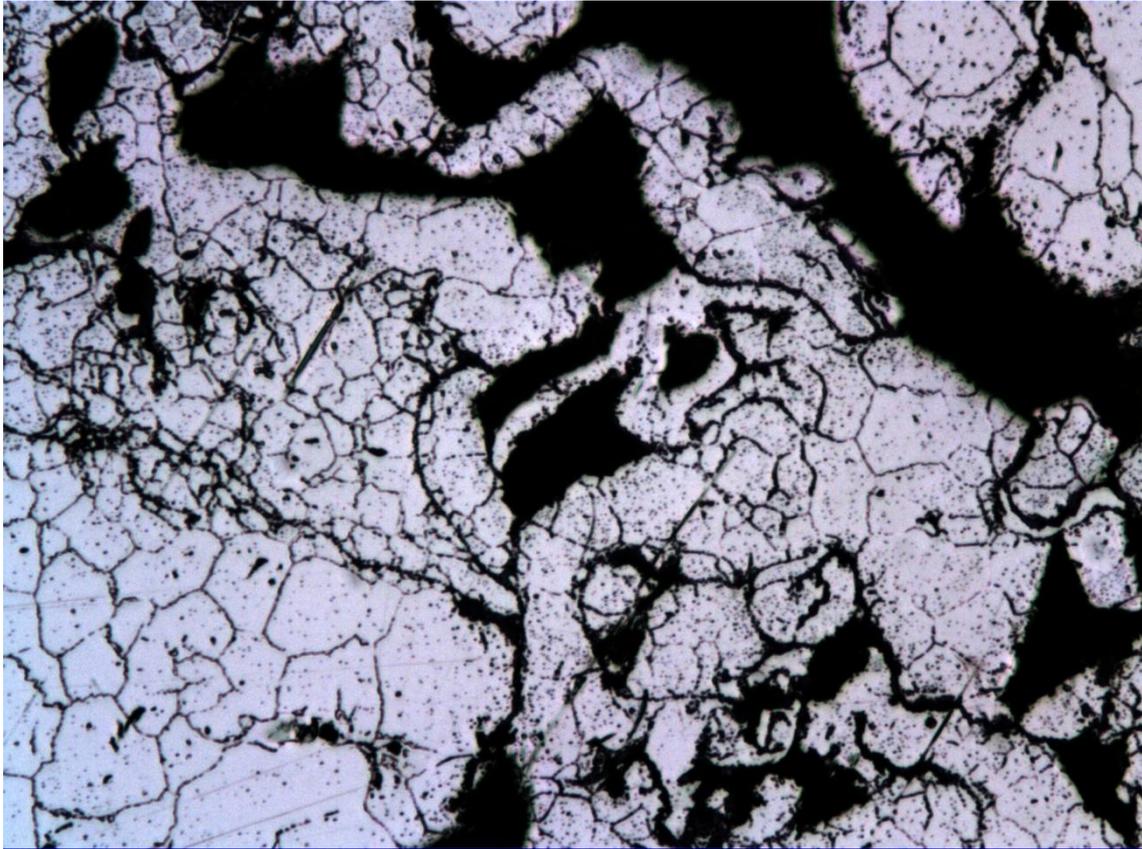
Micrografía nº 28: 316L [300-500 μm] (750 MPa) – 200 aumentos



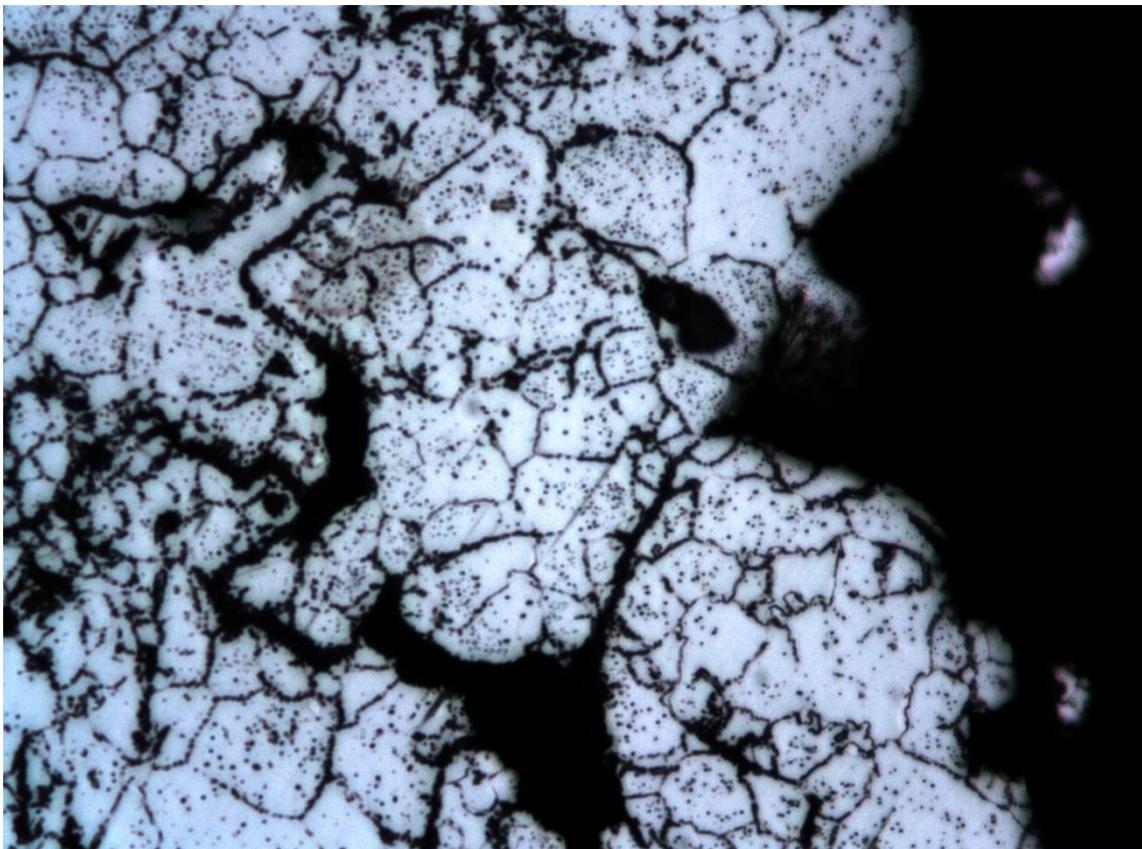
Micrografía nº 29: 316L [300-500 μm] (750 MPa) – 500 aumentos



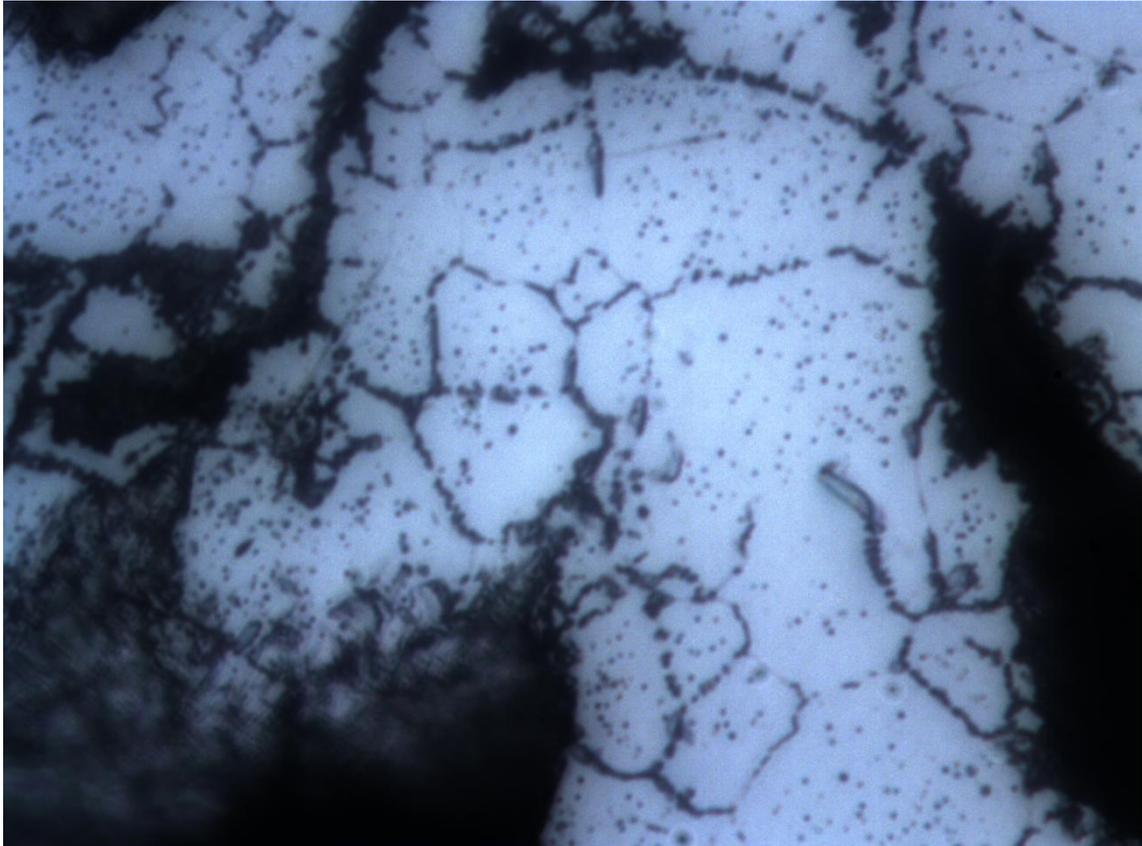
Micrografía nº 30: 316L [300-500 μm] (550 MPa) – 50 aumentos



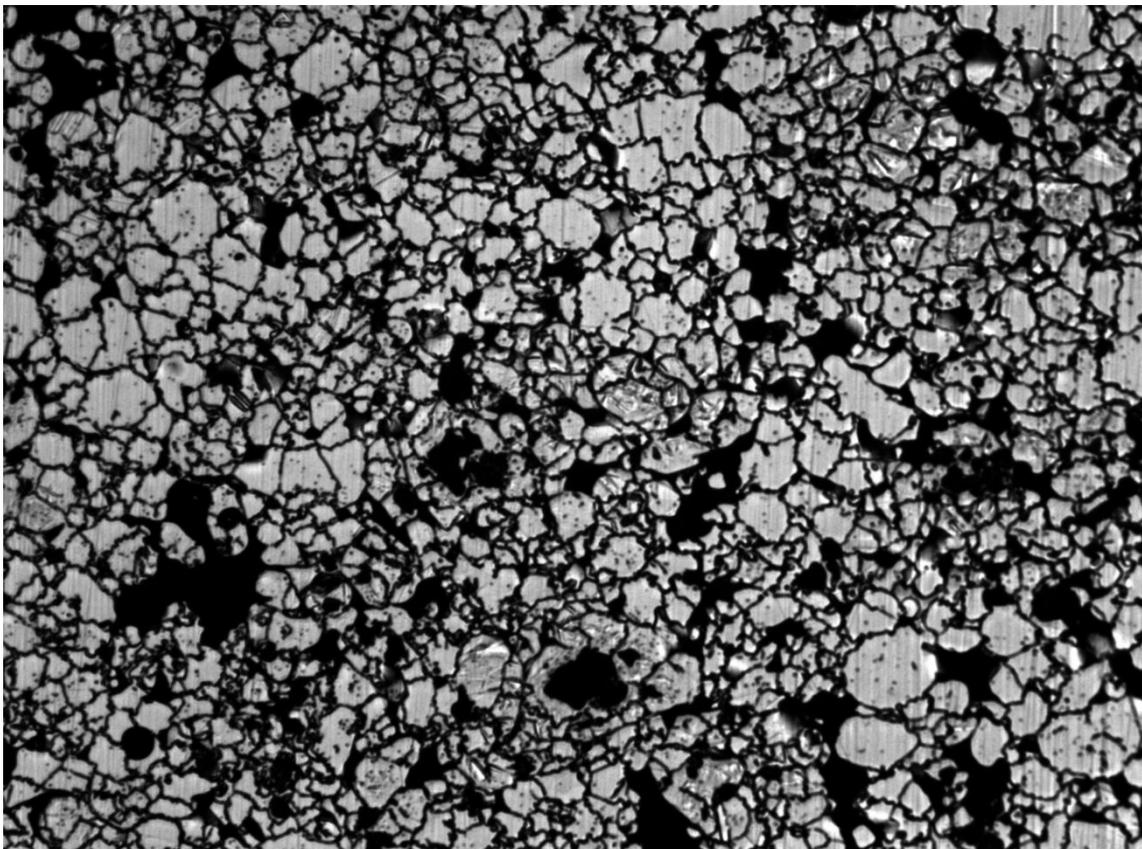
Micrografía nº 31: 316L [300-500 μm] (550 MPa) – 100 aumentos



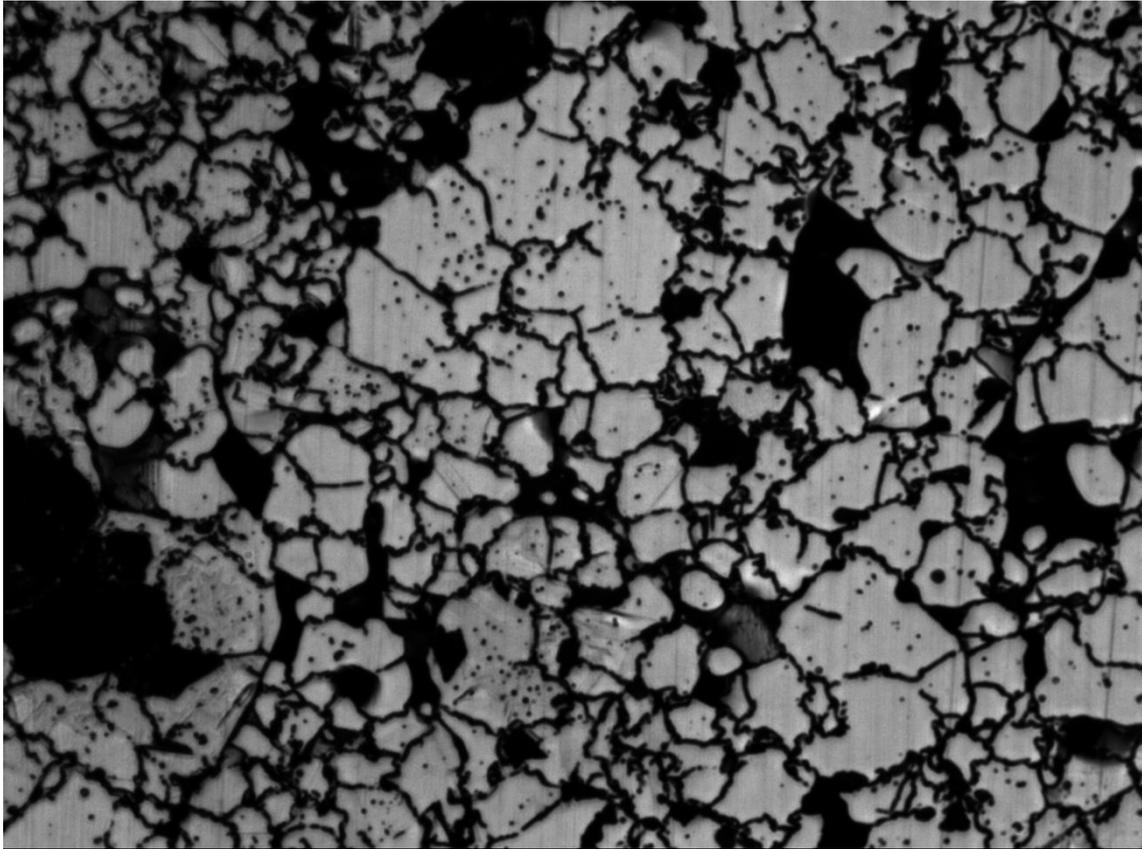
Micrografía nº 32: 316L [300-500 μm] (550 MPa) – 200 aumentos



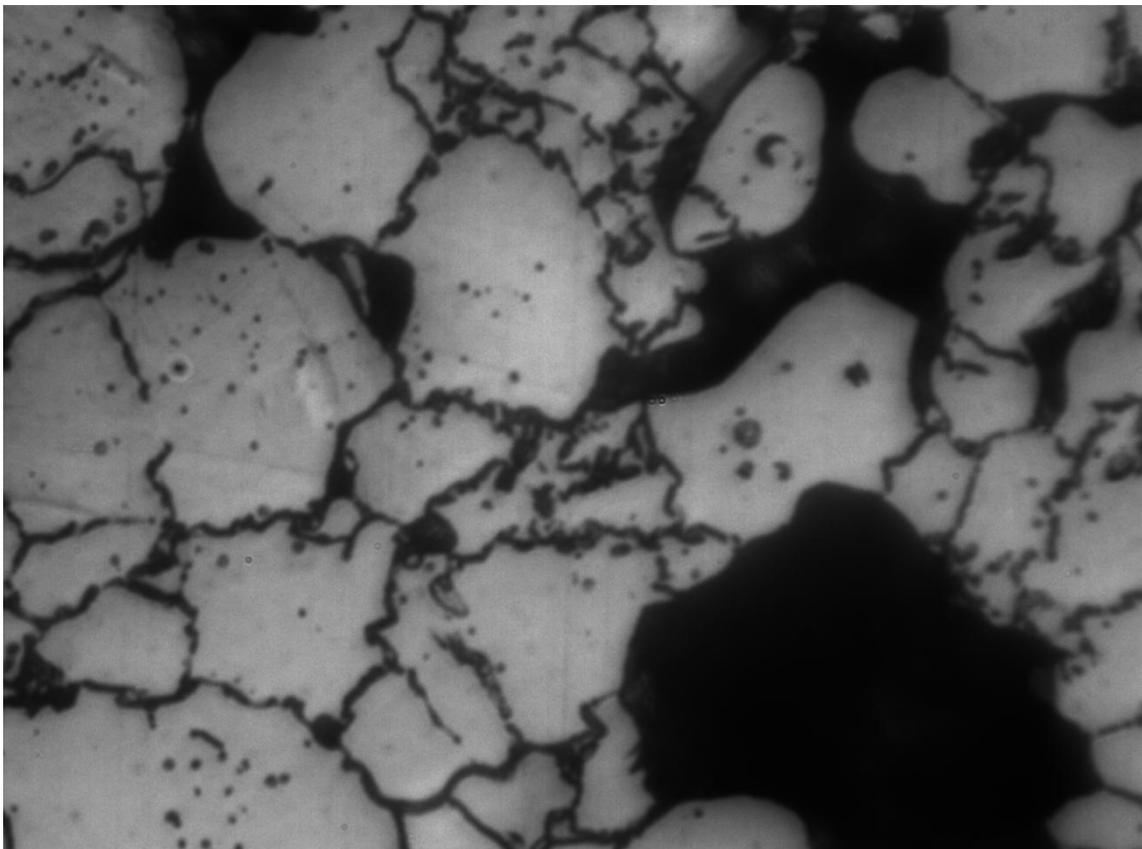
Micrografía nº 33: 316L [300-500 μm] (550 MPa) – 500 aumentos



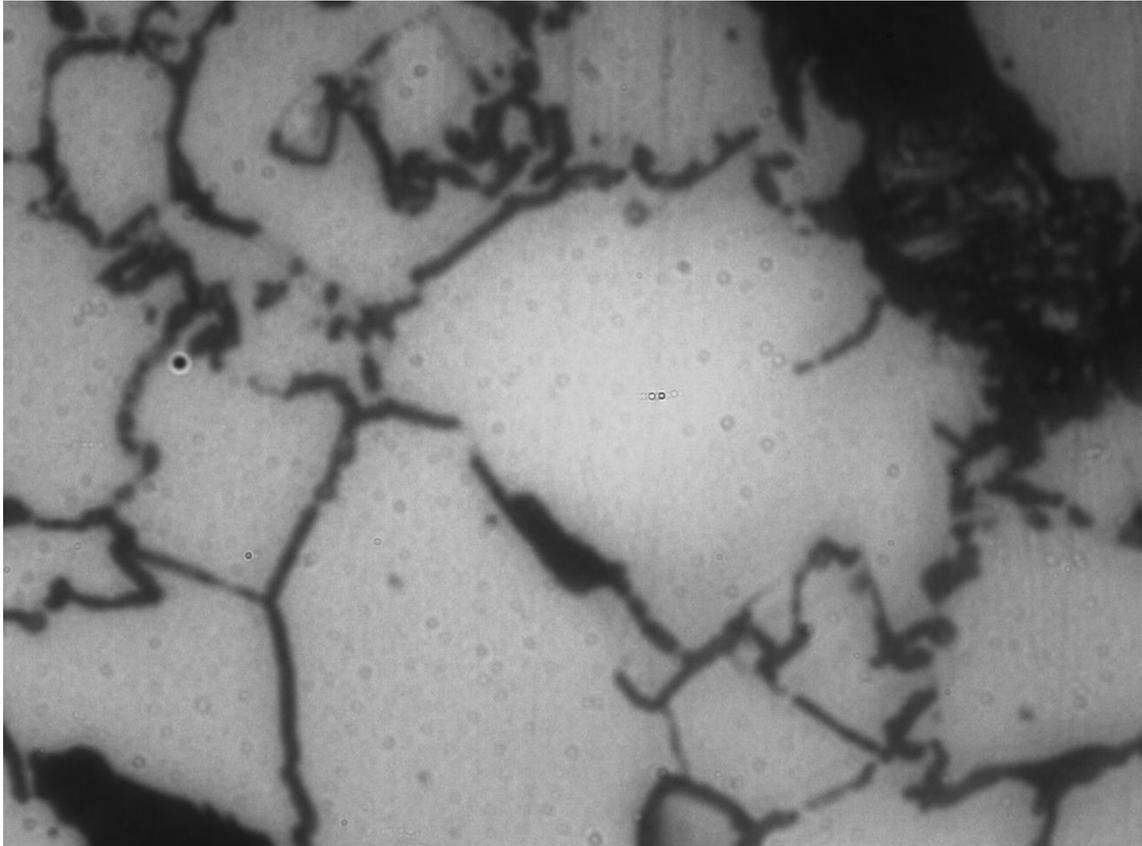
Micrografía nº 34: Dúplex 50/50 (550 MPa) – 100 aumentos



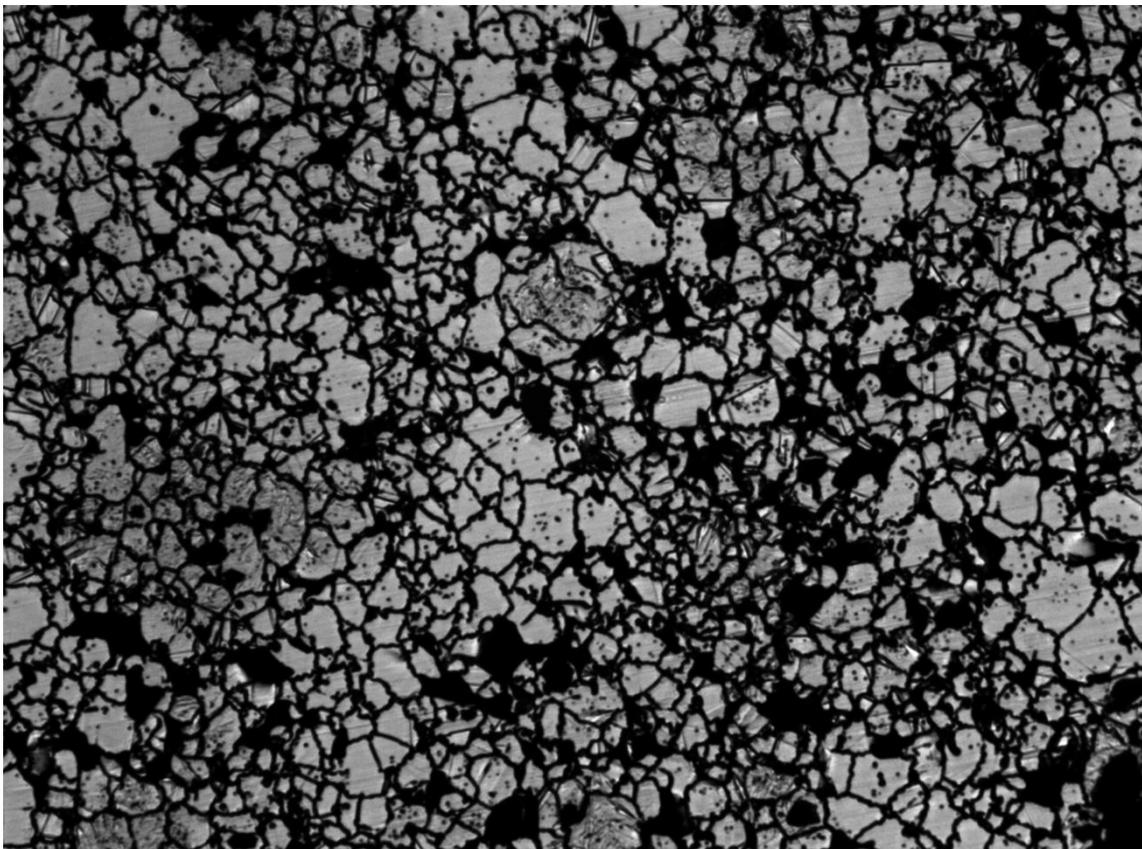
Micrografía nº 35: Dúplex 50/50 (550 MPa) – 200 aumentos



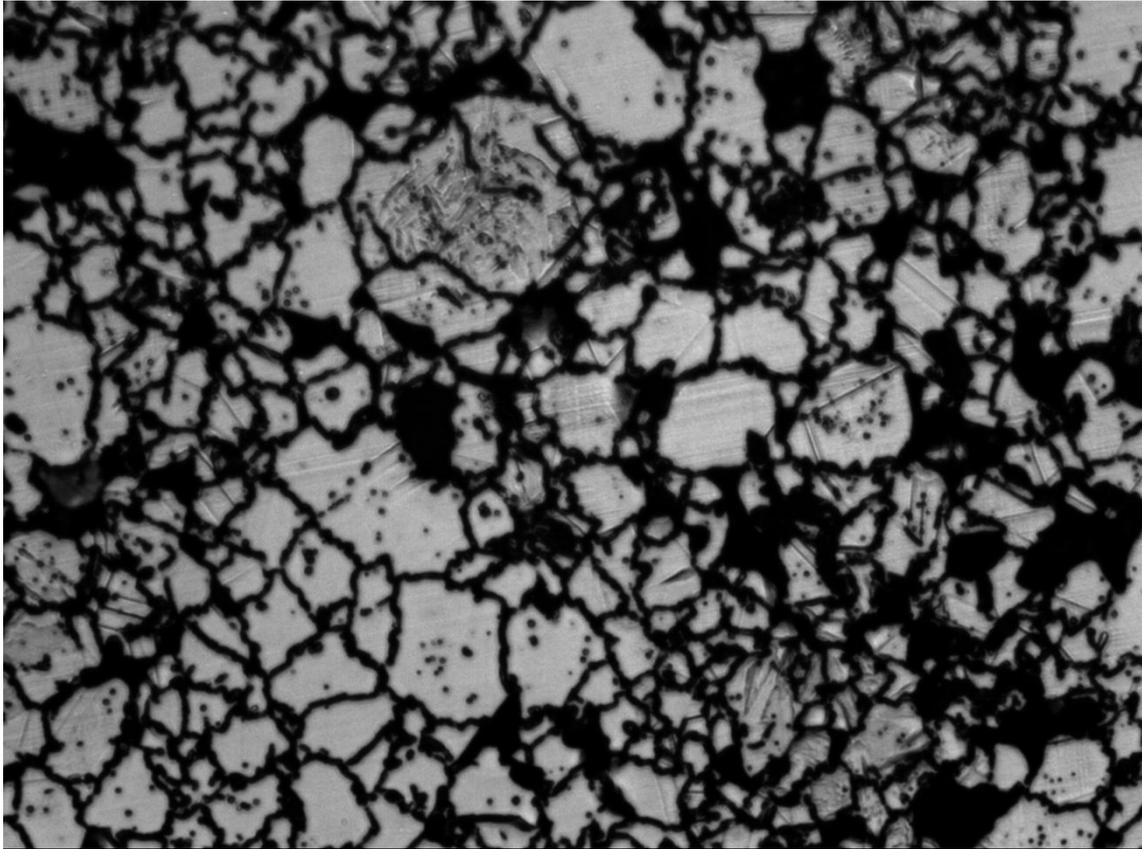
Micrografía nº 36: Dúplex 50/50 (550 MPa) – 500 aumentos



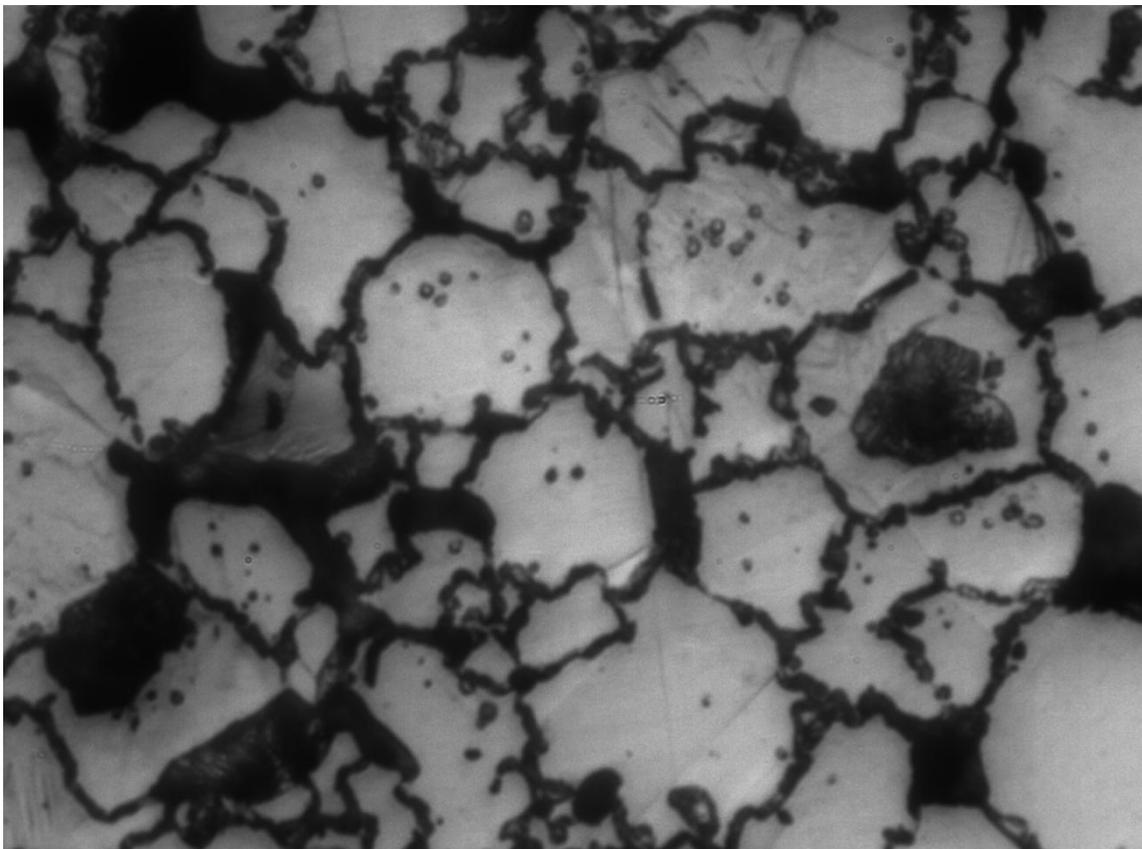
Micrografía nº 37: Dúplex 50/50 (550 MPa) – 1000 aumentos



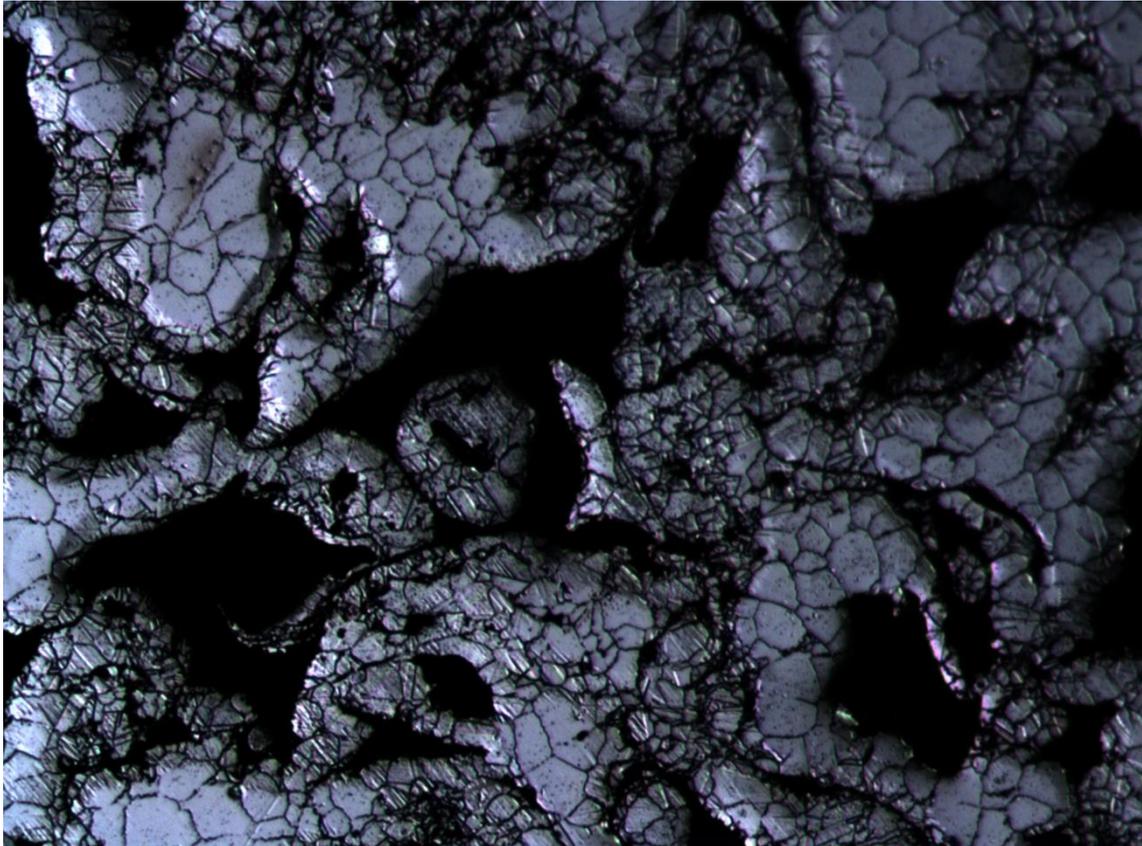
Micrografía nº 38: Dúplex 50/50 (750 MPa) – 100 aumentos



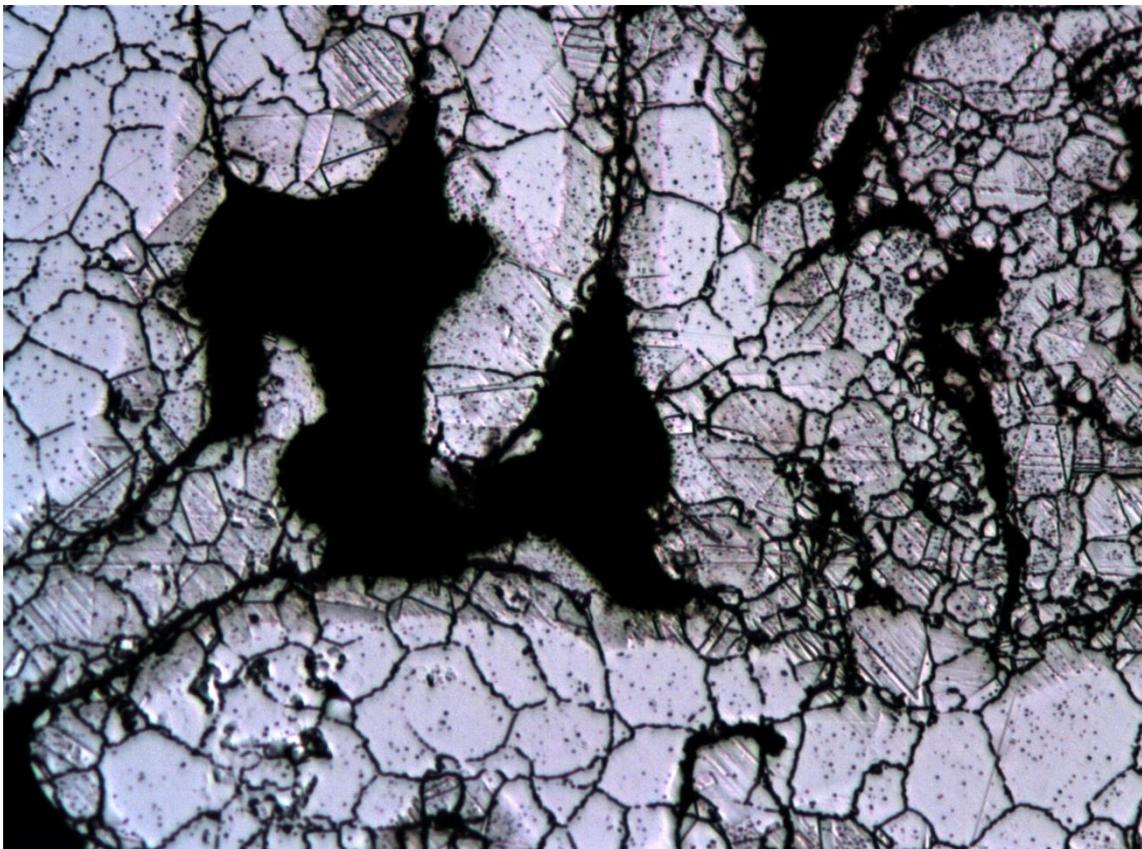
Micrografía nº 39: Dúplex 50/50 (750 MPa) – 200 aumentos



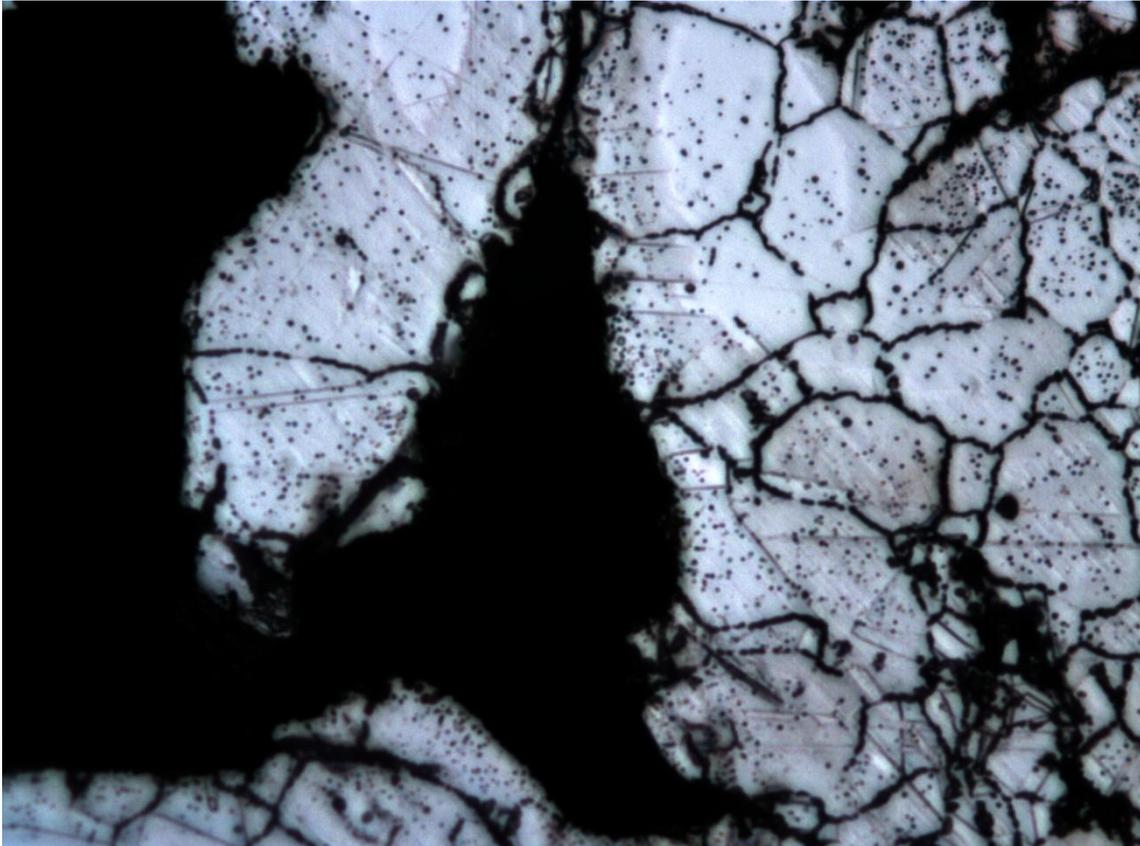
Micrografía nº 40: Dúplex 50/50 (750 MPa) – 500 aumentos



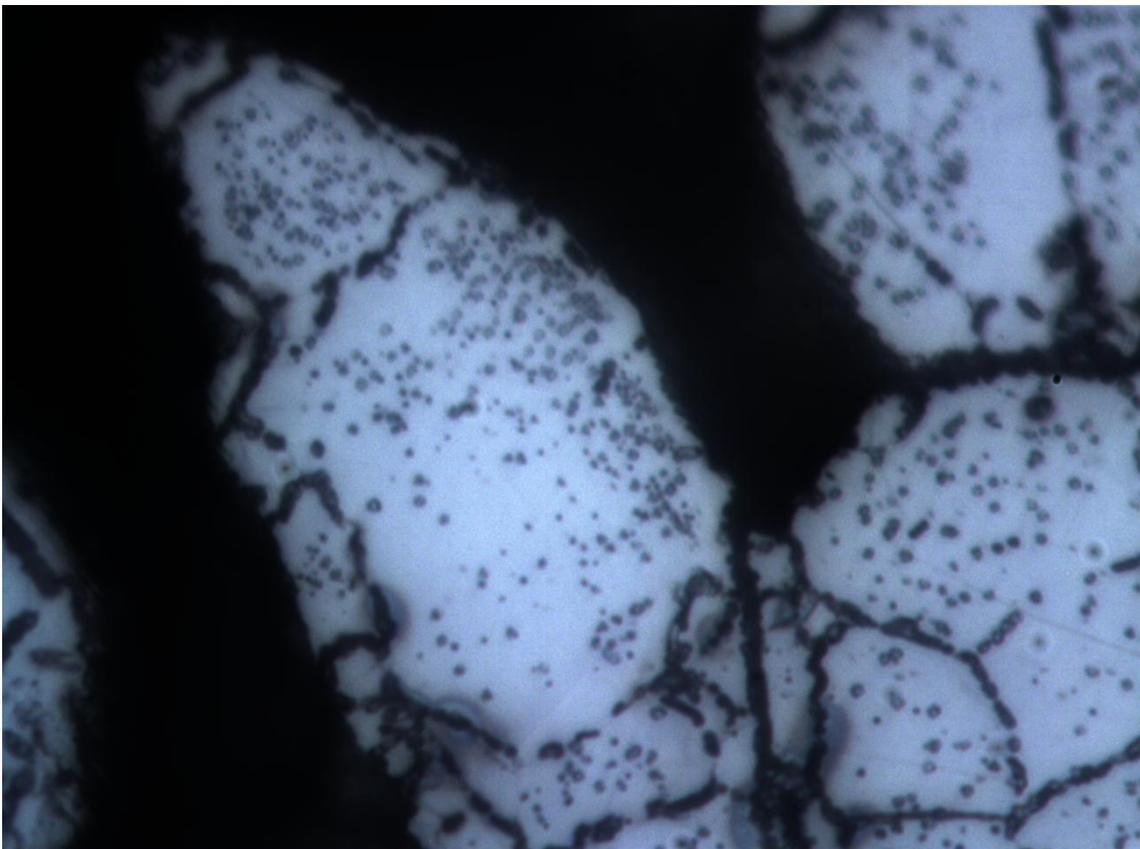
Micrografía nº 41: Mezcla Austenítica (750 MPa) – 50 aumentos



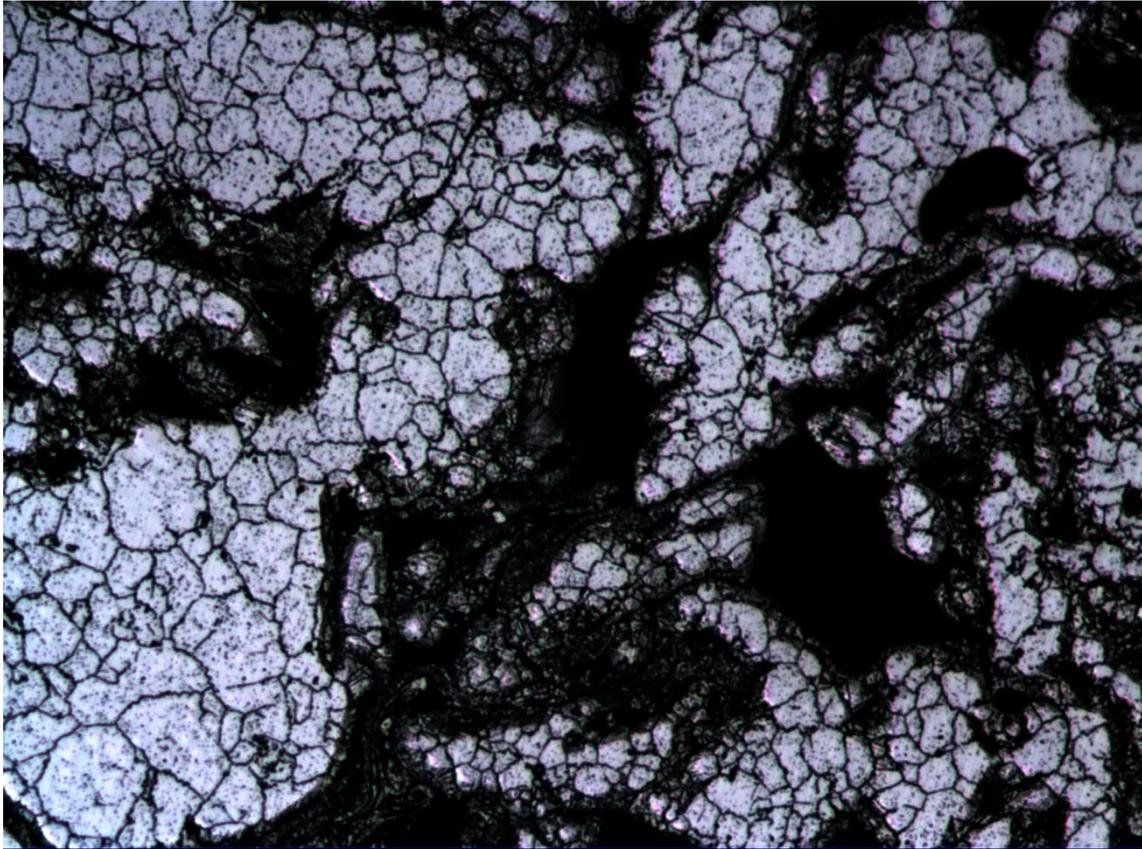
Micrografía nº 42: Mezcla Austenítica (750 MPa) – 100 aumentos



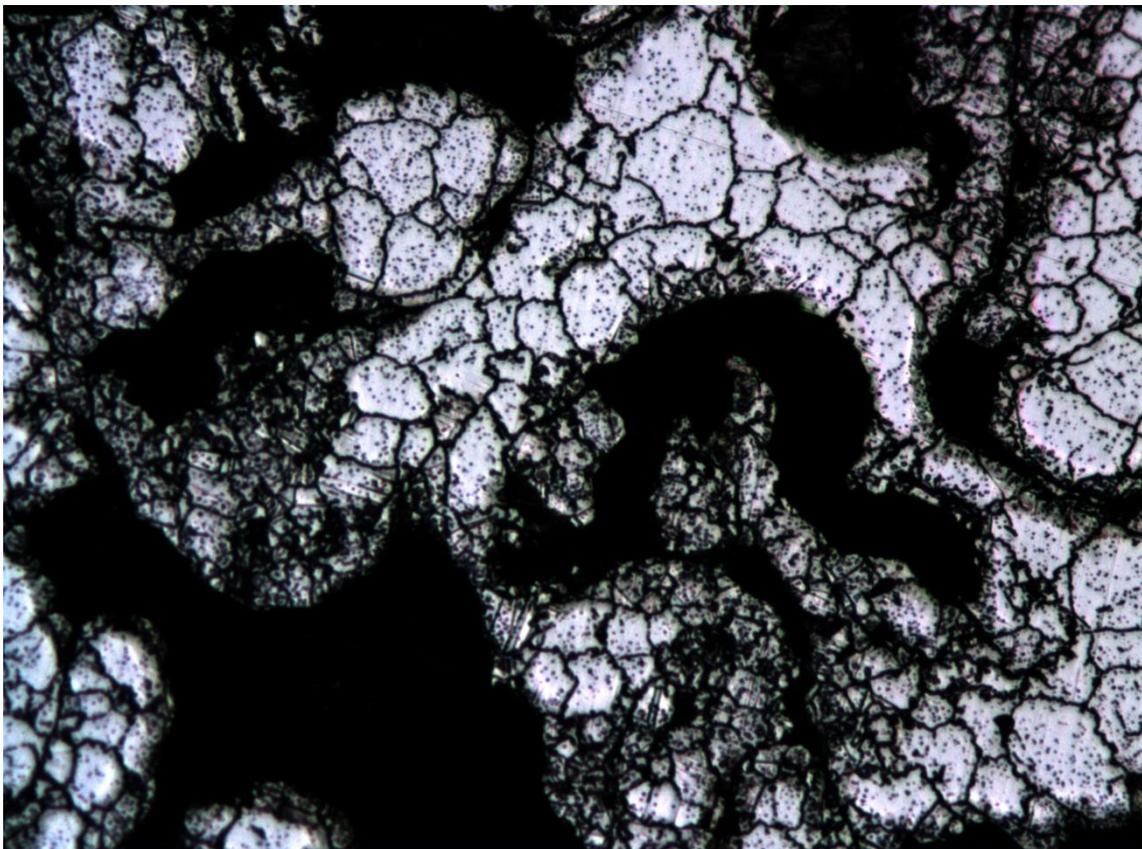
Micrografía nº 43: Mezcla Austenítica (750 MPa) – 200 aumentos



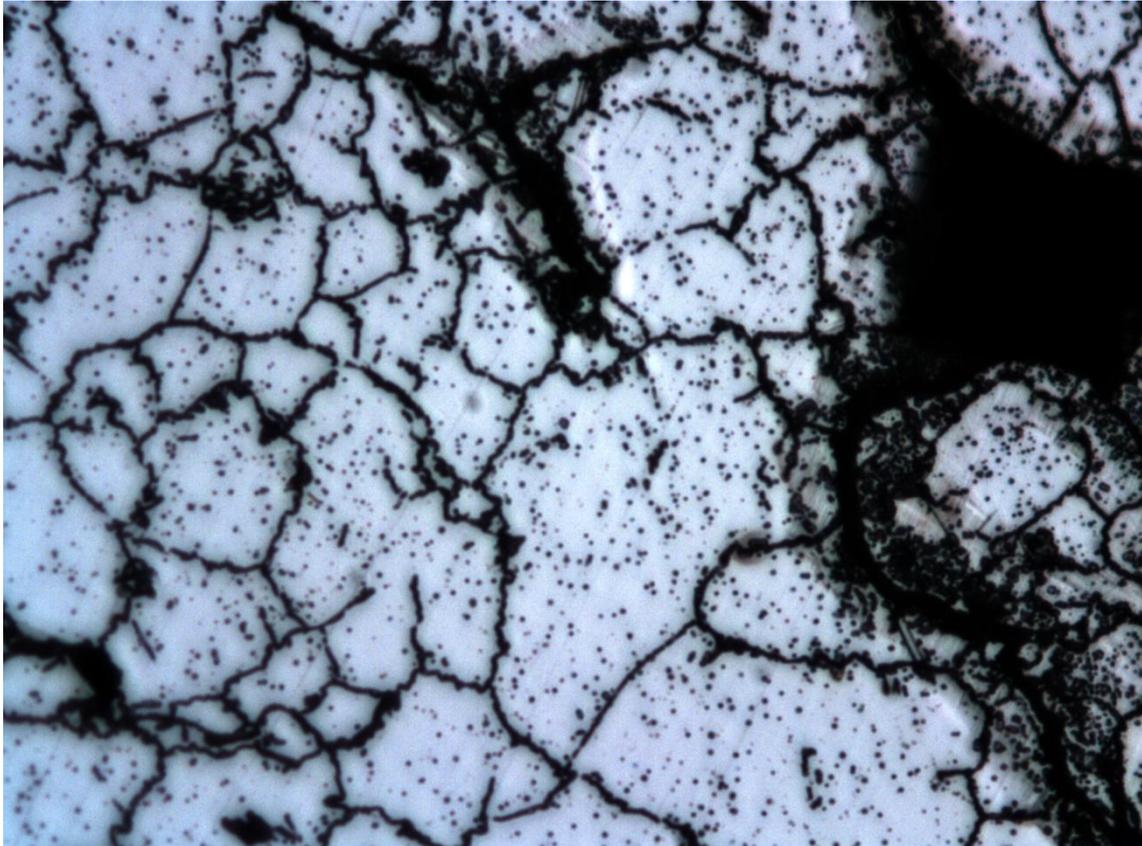
Micrografía nº 44: Mezcla Austenítica (750 MPa) – 500 aumentos



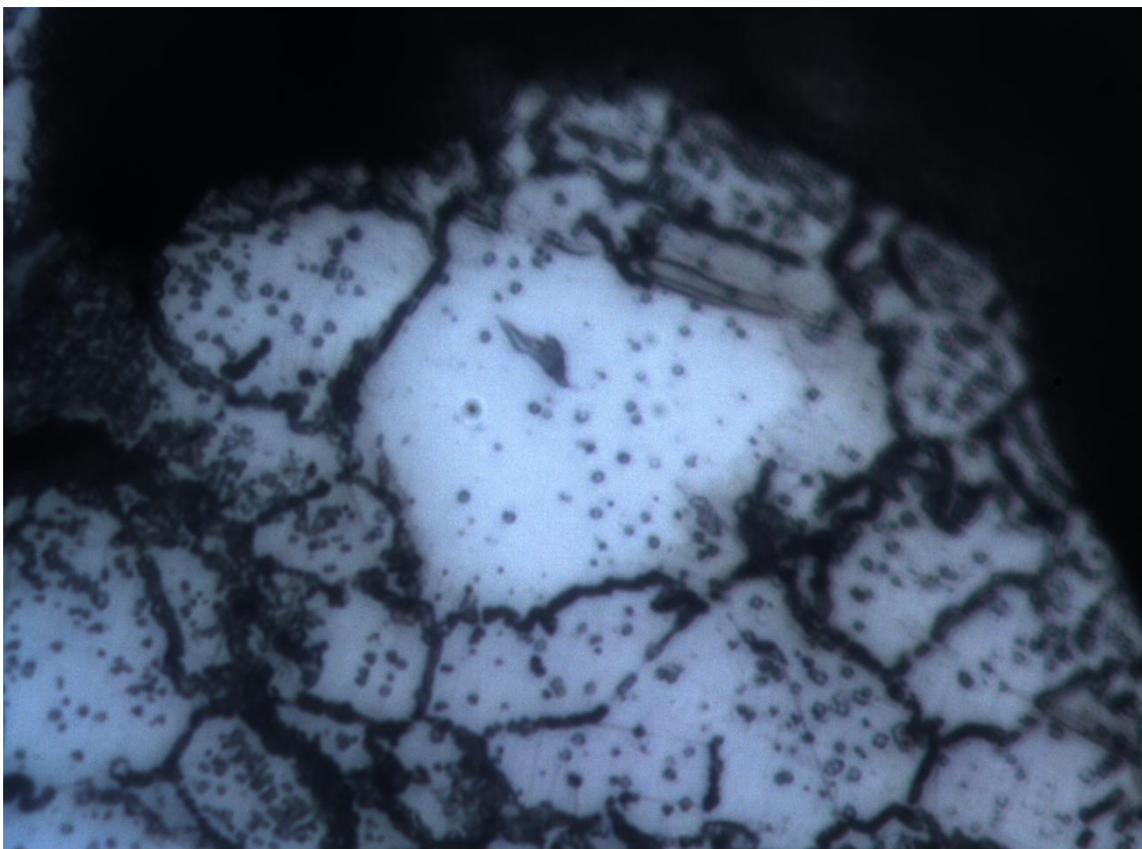
Micrografía nº 45: Mezcla Austenítica (550 MPa) – 50 aumentos



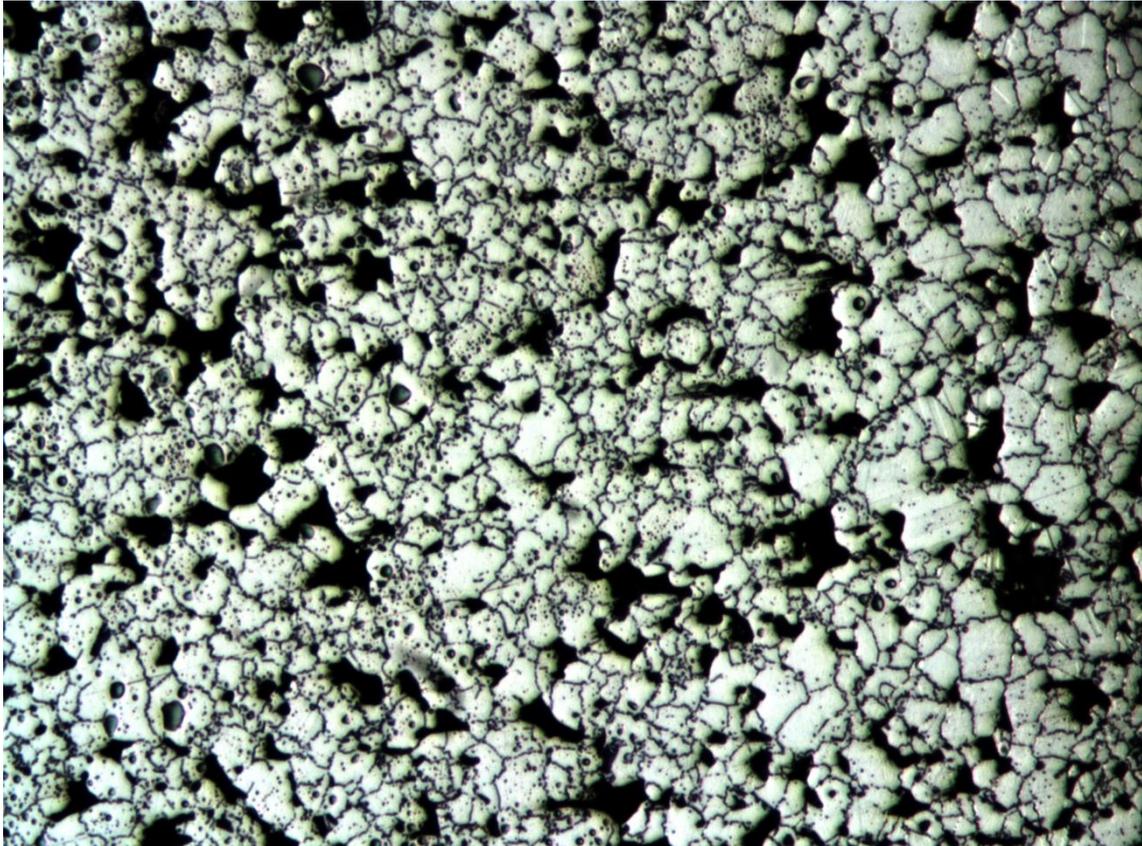
Micrografía nº 46: Mezcla Austenítica (550 MPa) – 100 aumentos



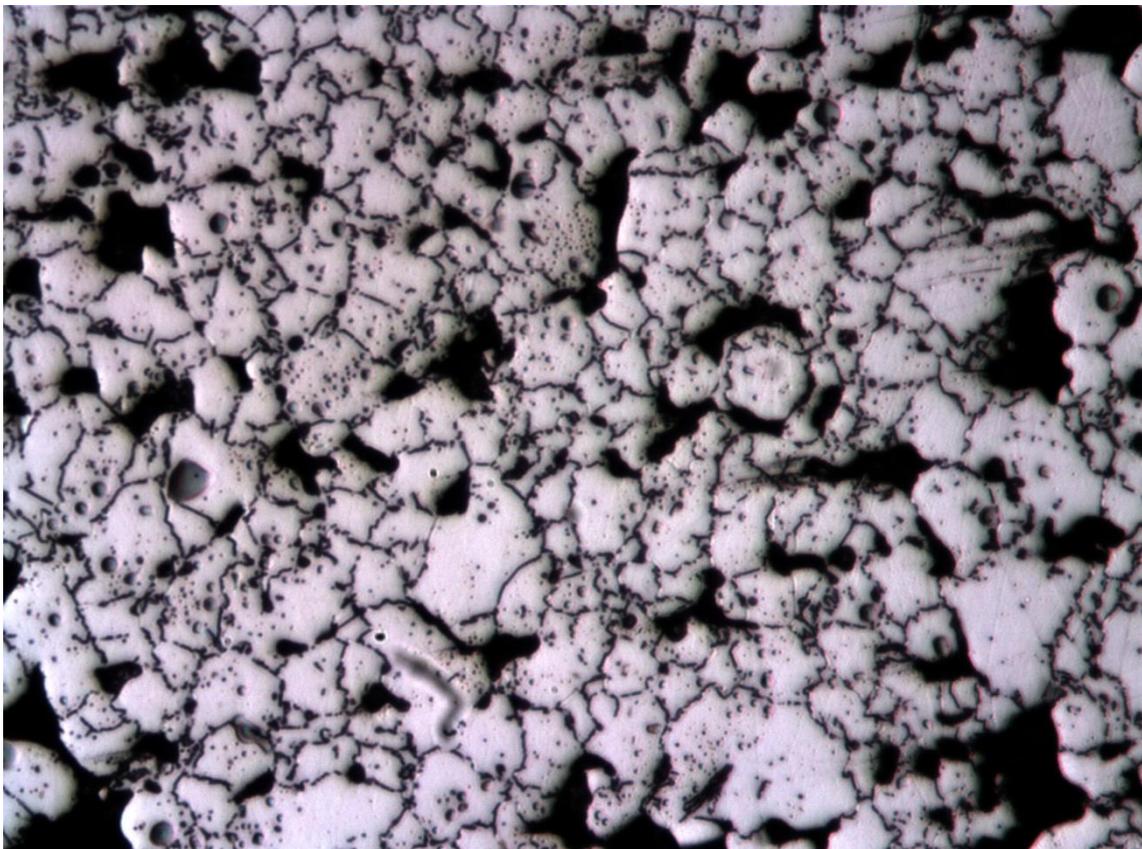
Micrografía nº 47: Mezcla Austenítica (550 MPa) – 200 aumentos



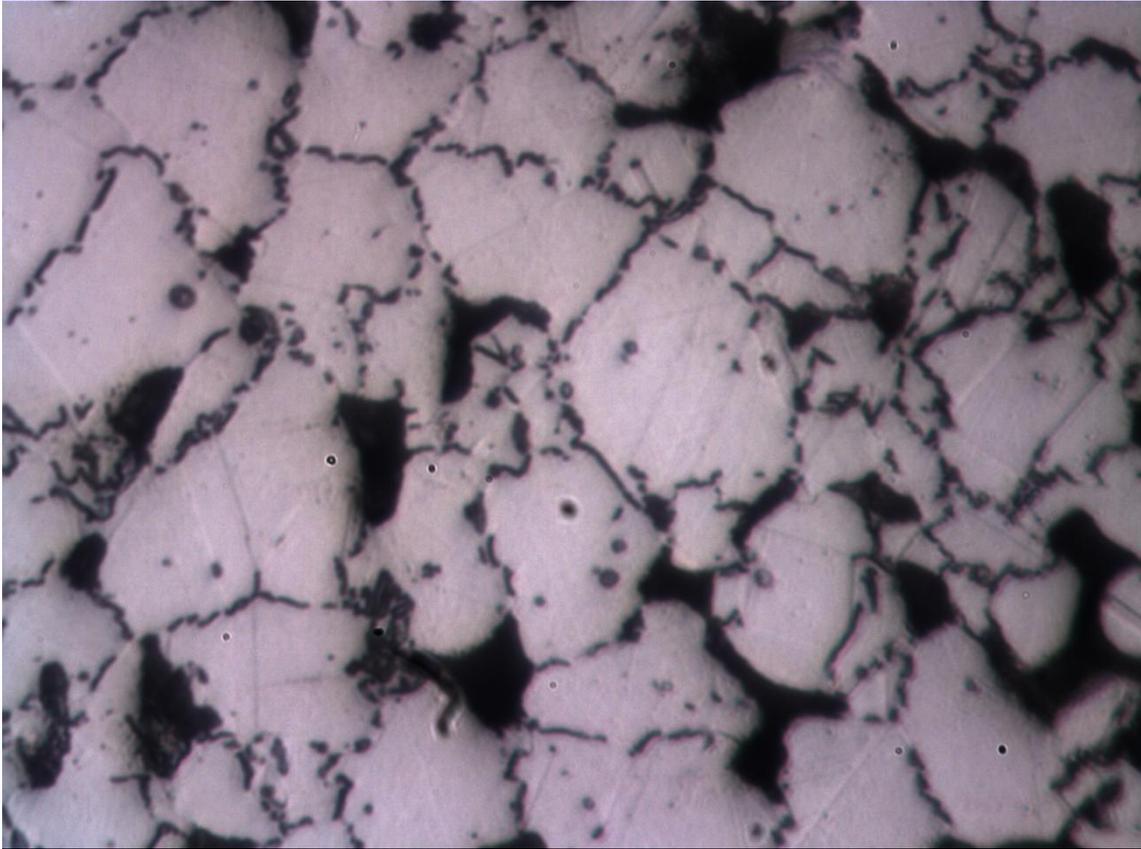
Micrografía nº 48: Mezcla Austenítica (550 MPa) – 500 aumentos



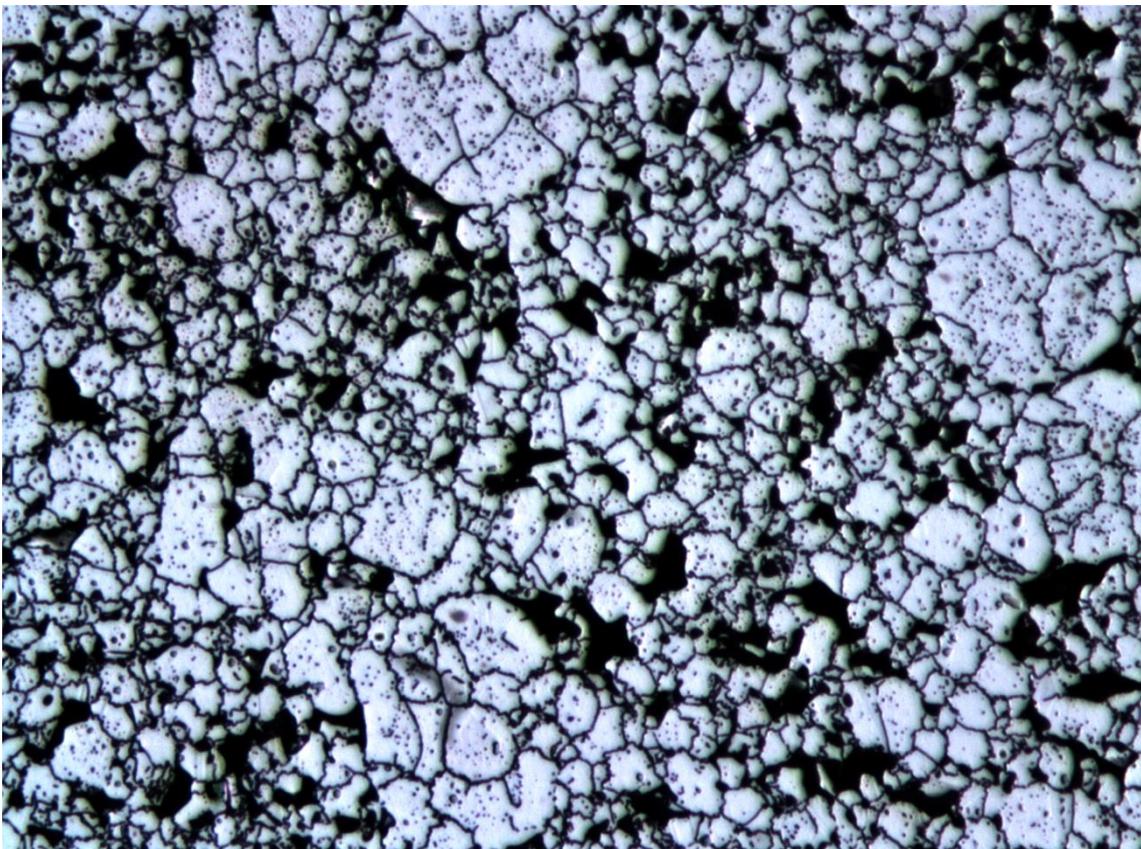
Micrografía nº 49: Capa 316L [1/2] (750 MPa) – 100 aumentos



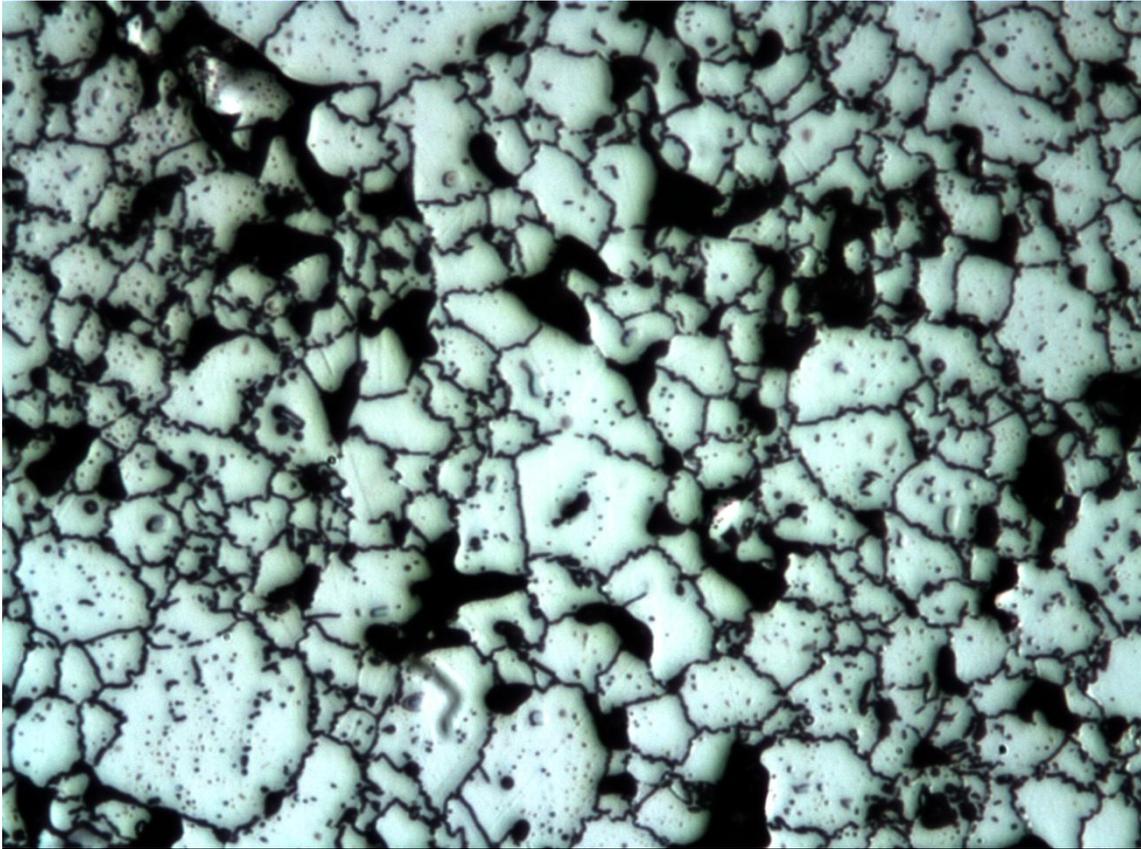
Micrografía nº 50: Capa 316L [1/2] (750 MPa) – 200 aumentos



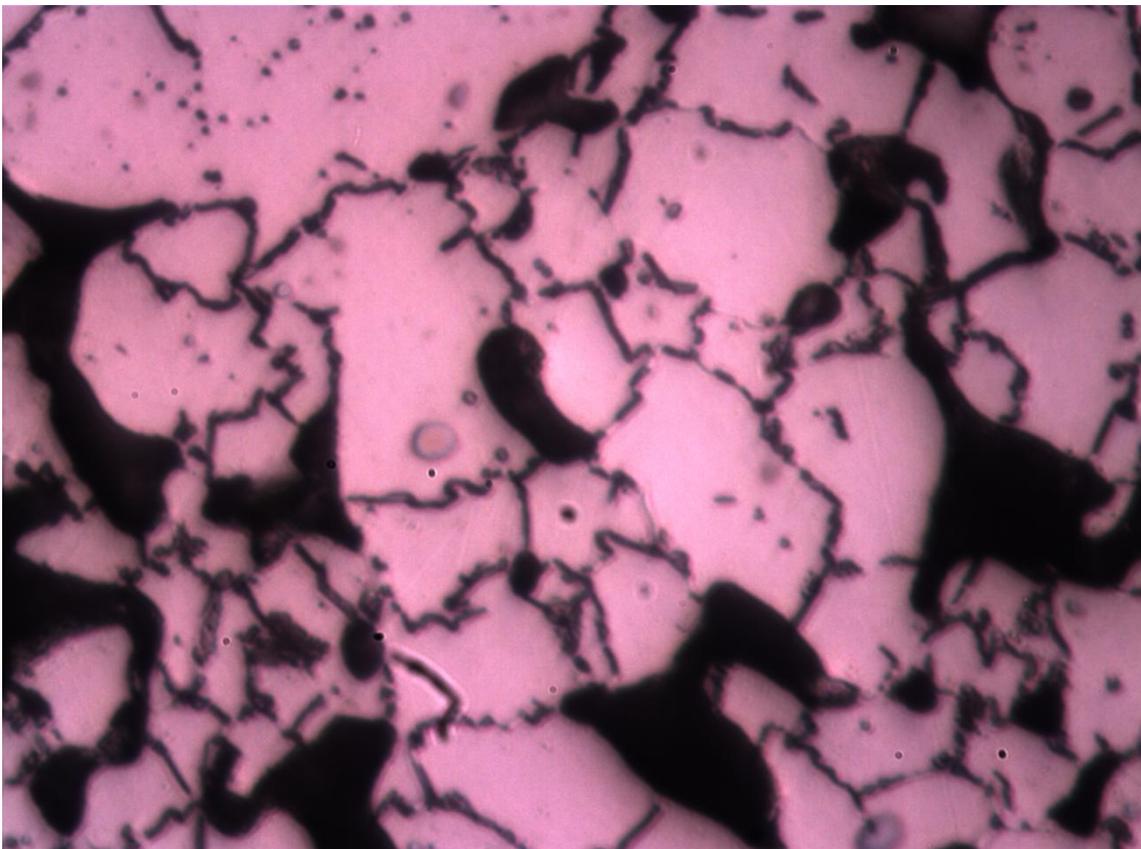
Micrografía nº 51: Capa 316L [½] (750 MPa) – 500 aumentos



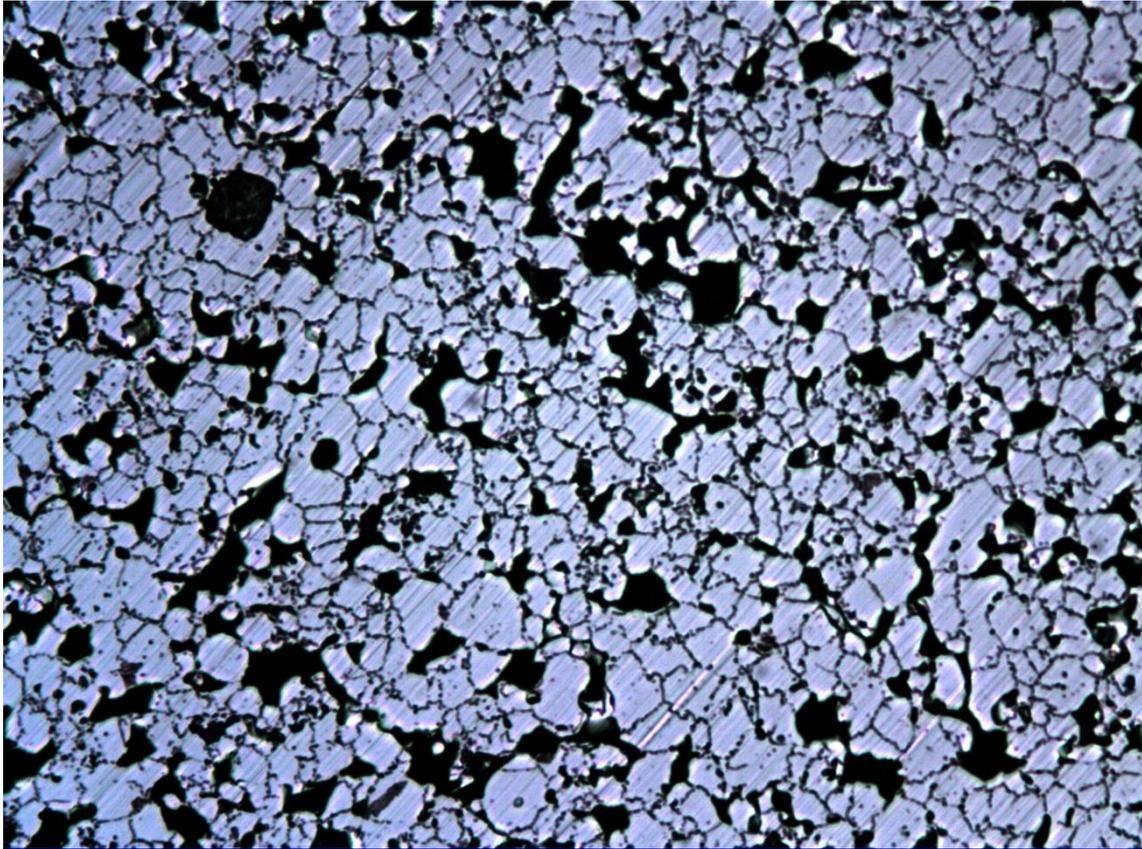
Micrografía nº 52: Capa Mezcla 316L [½] (750 MPa) – 100 aumentos



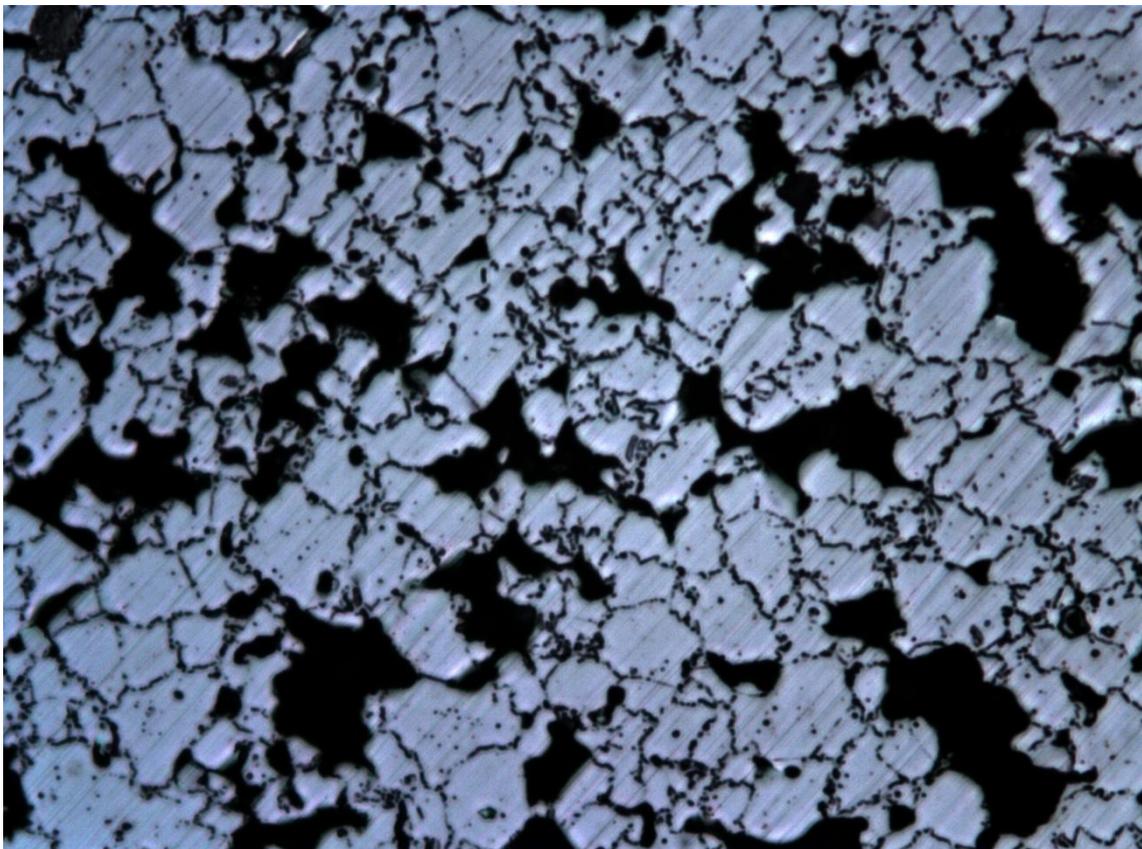
Micrografía nº 53: Capa Mezcla 316L [½] (750 MPa) – 200 aumentos



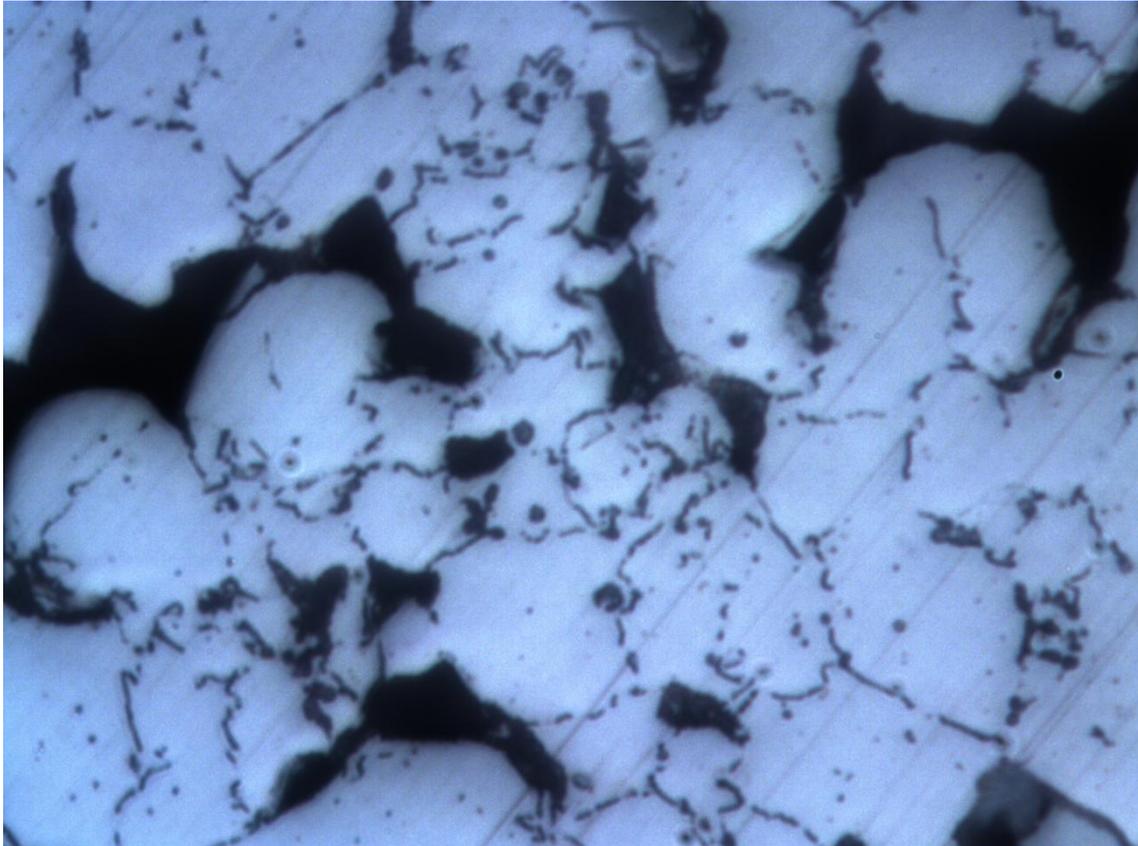
Micrografía nº 54: Capa Mezcla 316L [½] (750 MPa) – 500 aumentos



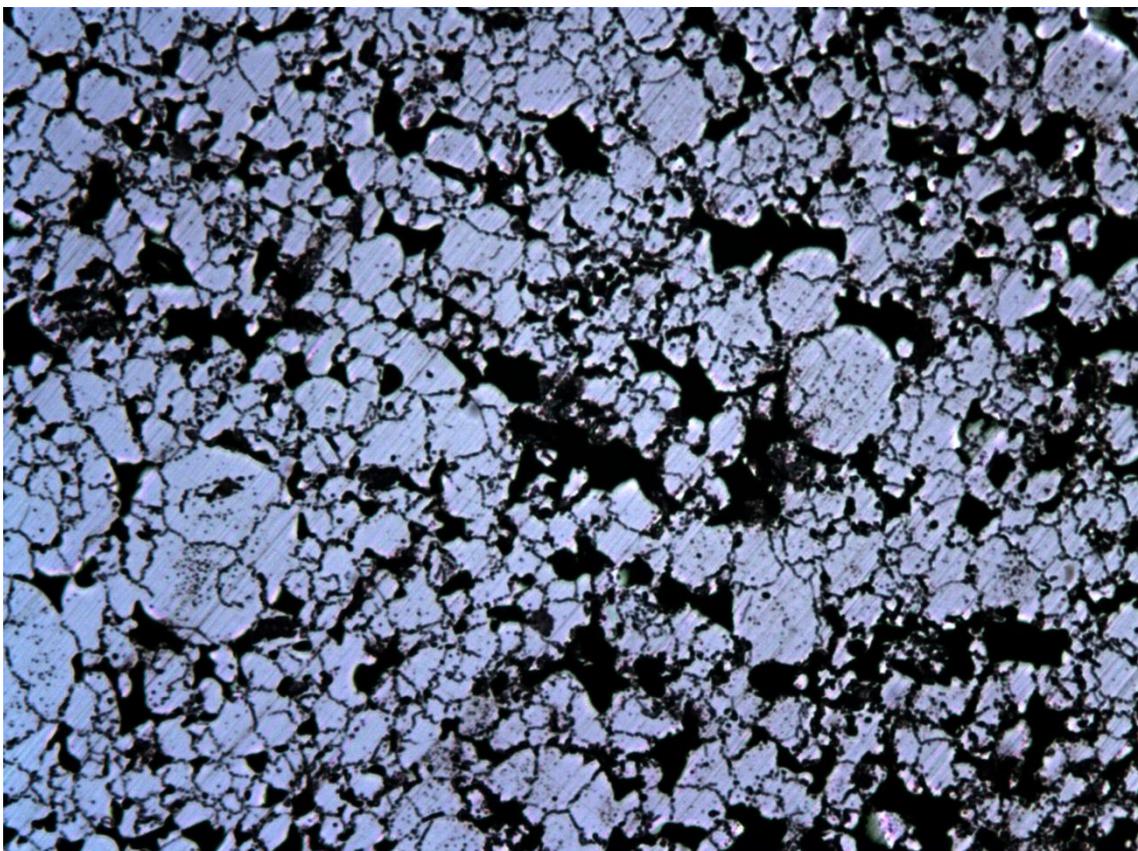
Micrografía nº 55: Capa 316L [½] (550 MPa) – 100 aumentos



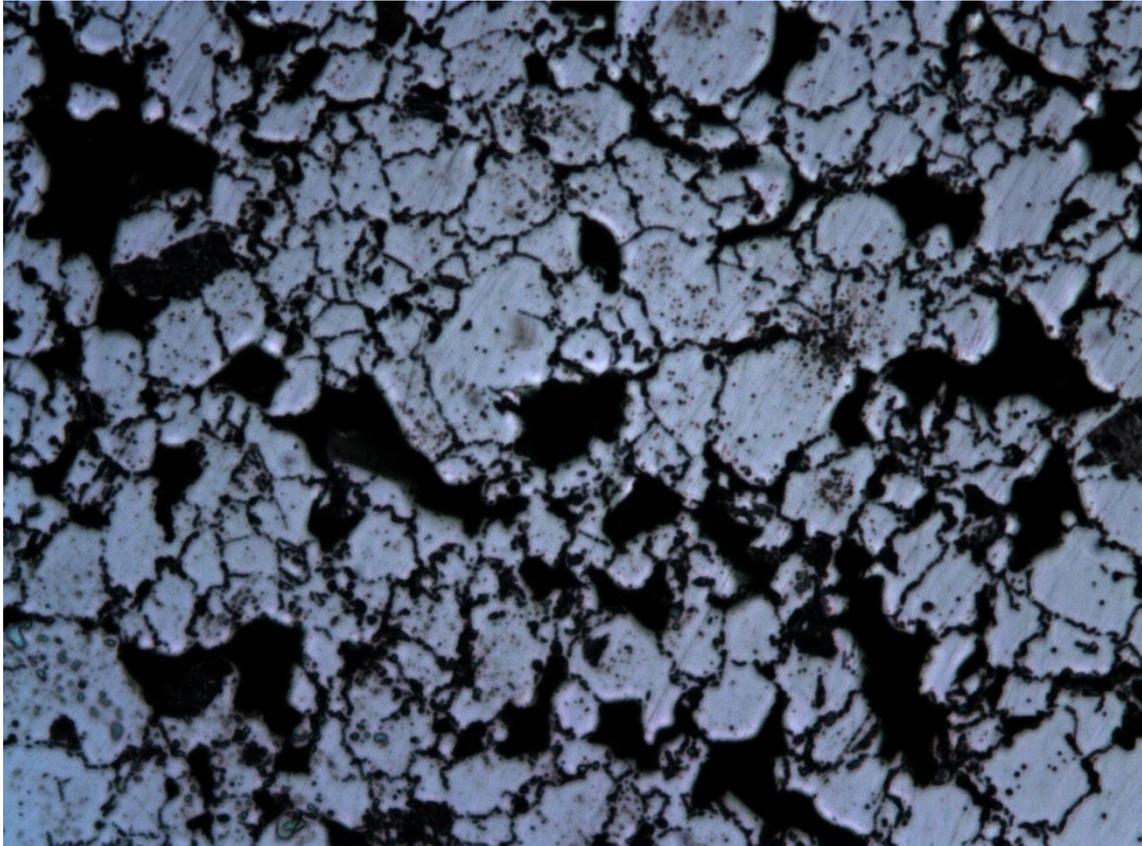
Micrografía nº 56: Capa 316L [½] (550 MPa) – 200 aumentos



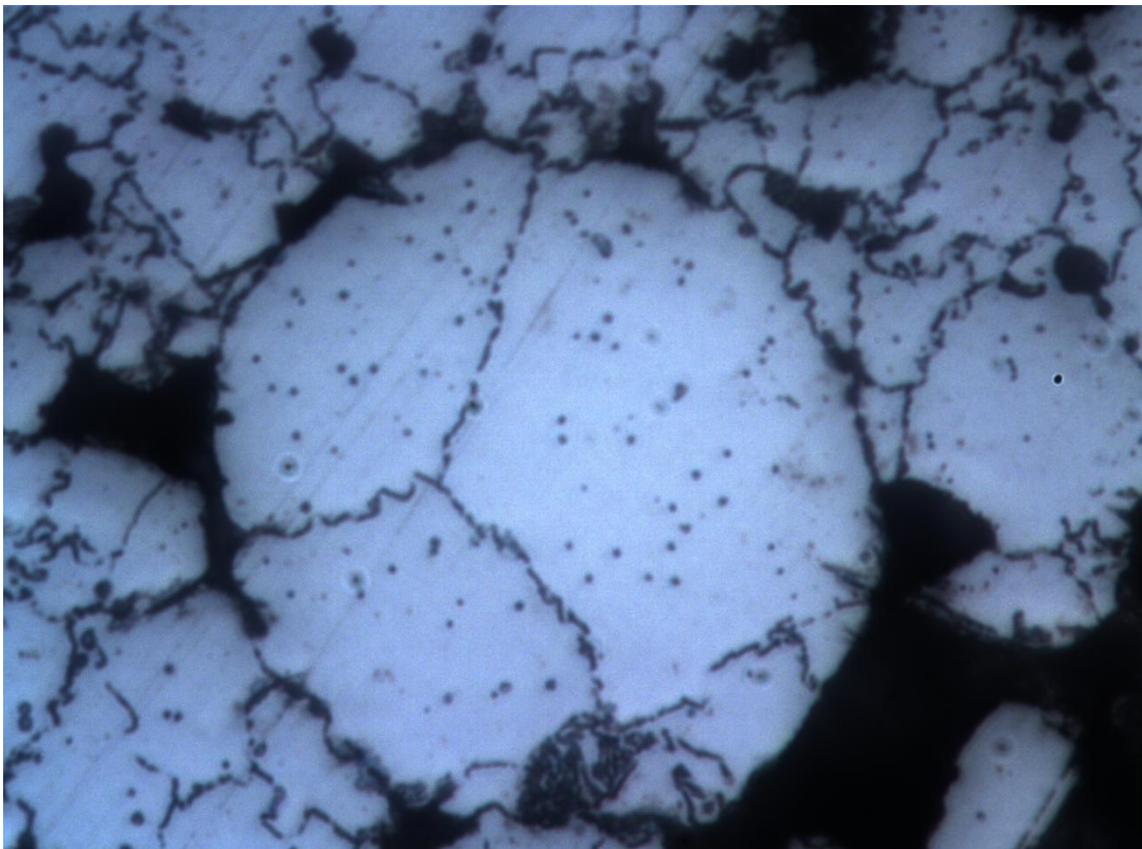
Micrografía nº 57: Capa 316L [1/2] (550 MPa) – 500 aumentos



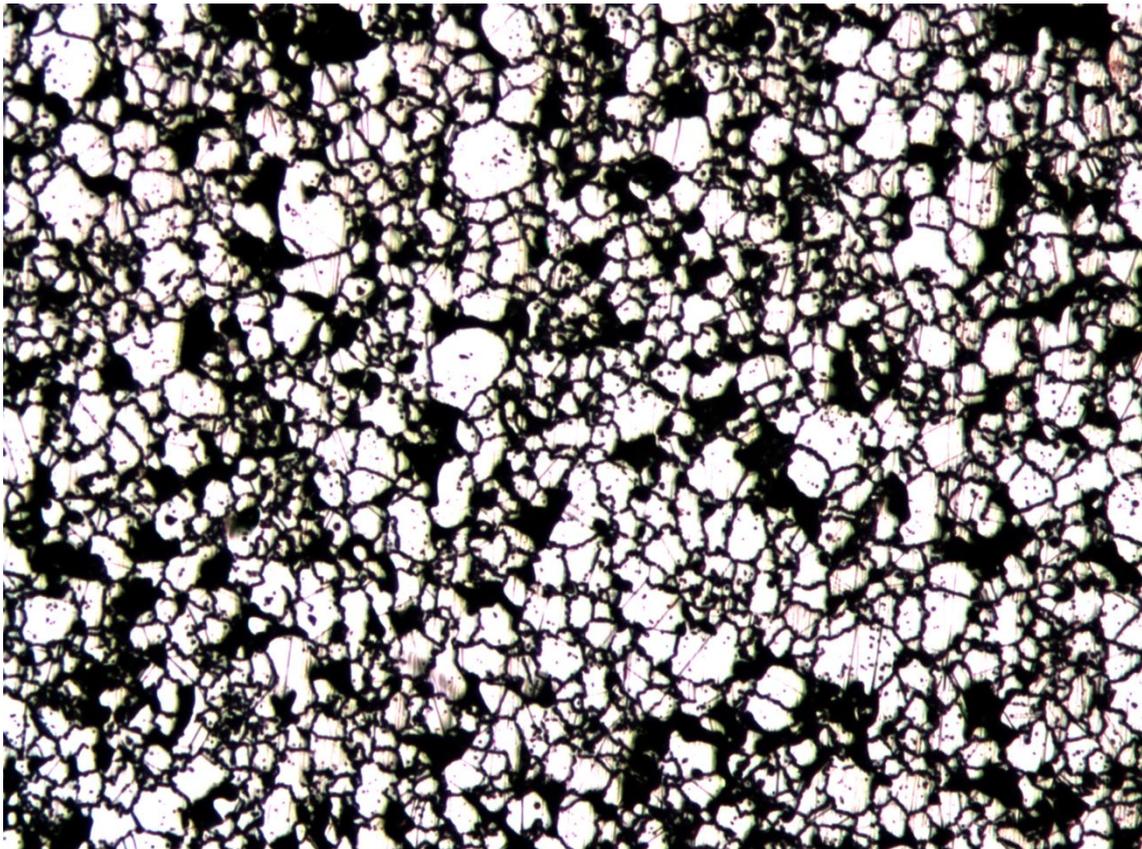
Micrografía nº 58: Capa Mezcla 316L [1/2] (550 MPa) – 100 aumentos



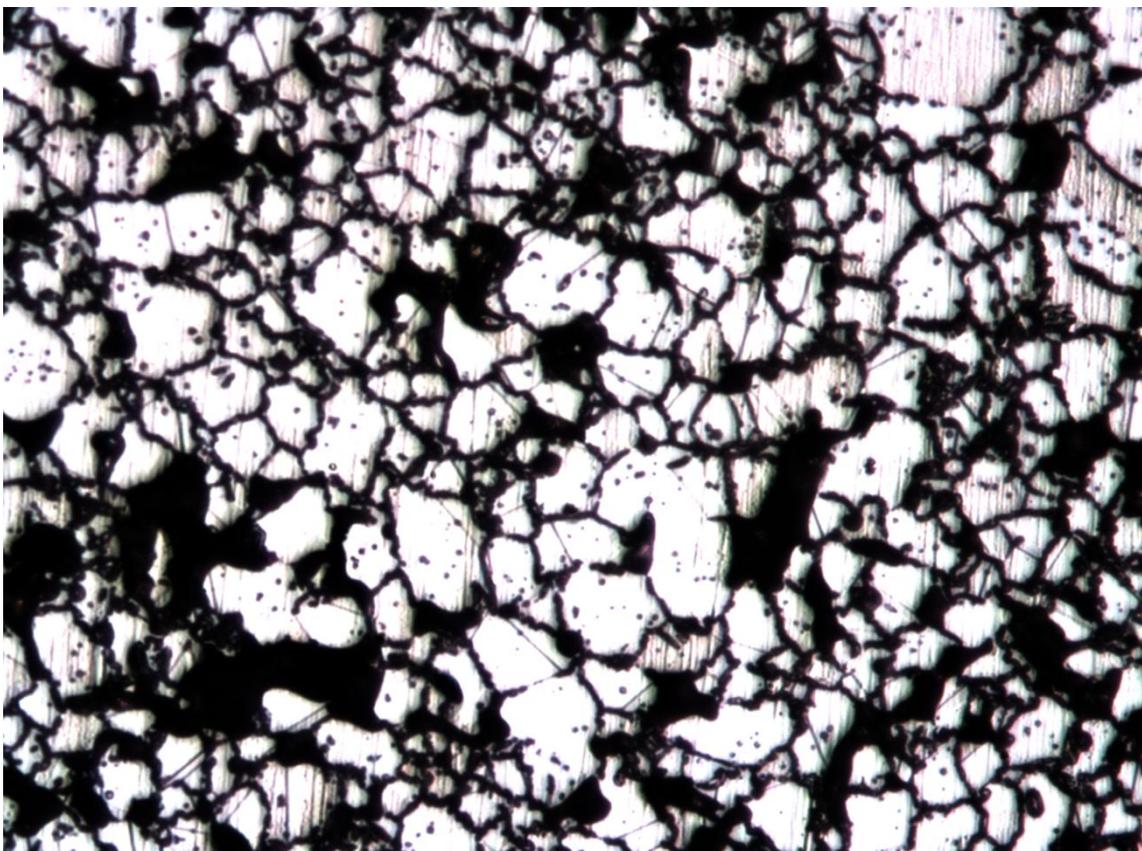
Micrografía n° 59: Capa Mezcla 316L [1/2] (550 MPa) – 200 aumentos



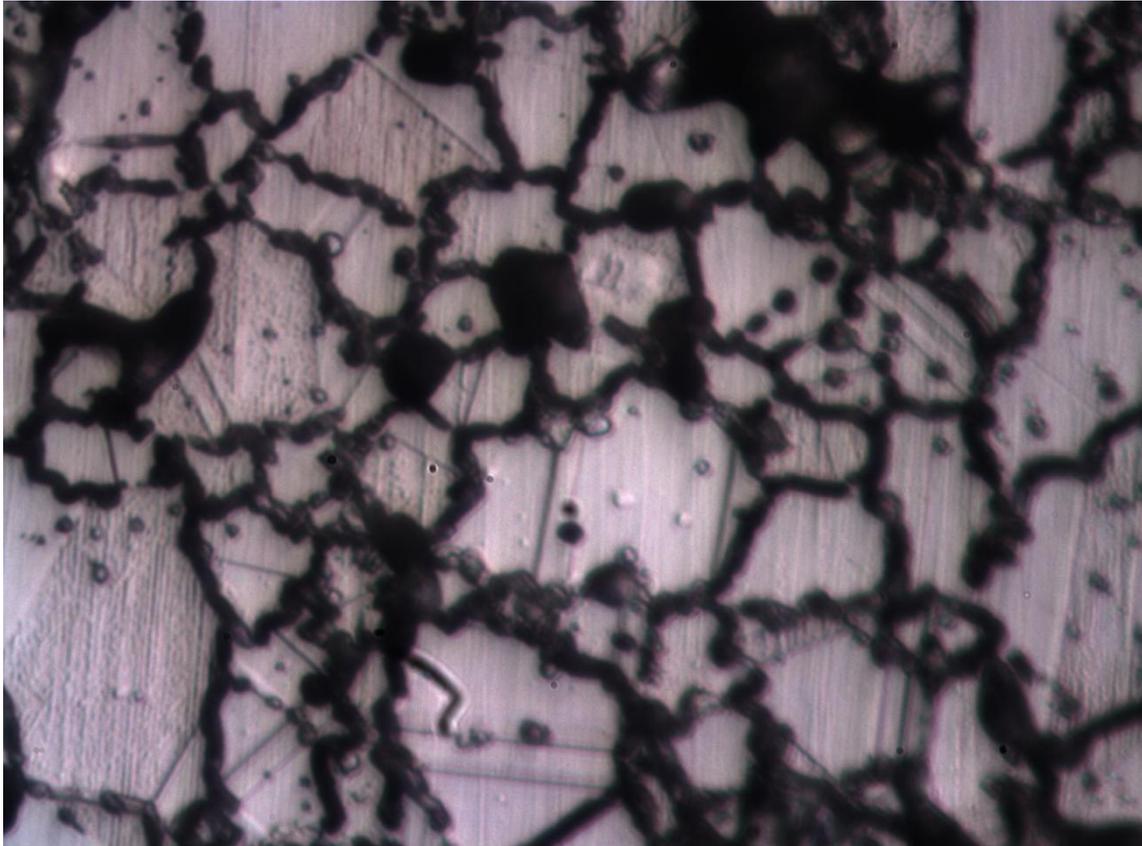
Micrografía n° 60: Capa Mezcla 316L [1/2] (550 MPa) – 500 aumentos



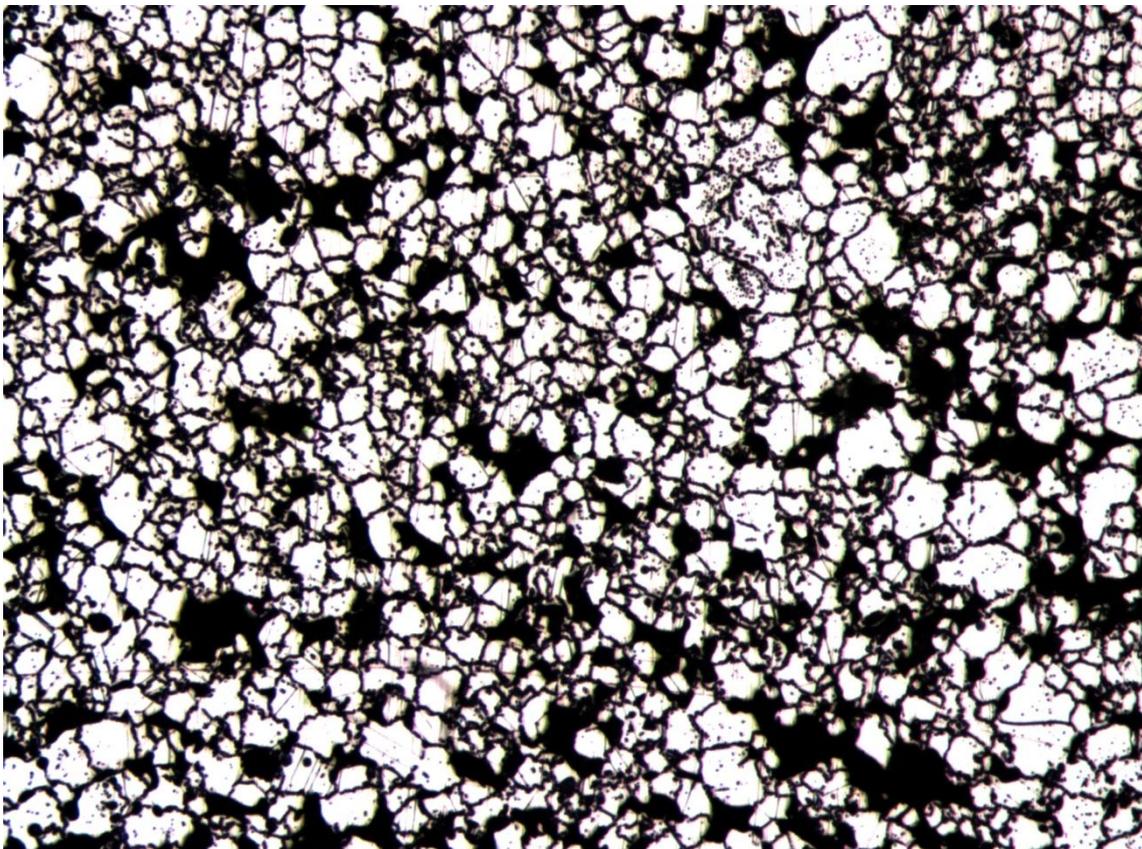
Micrografía nº 61: Capa 316L [$\frac{2}{3}$] (750 MPa) – 100 aumentos



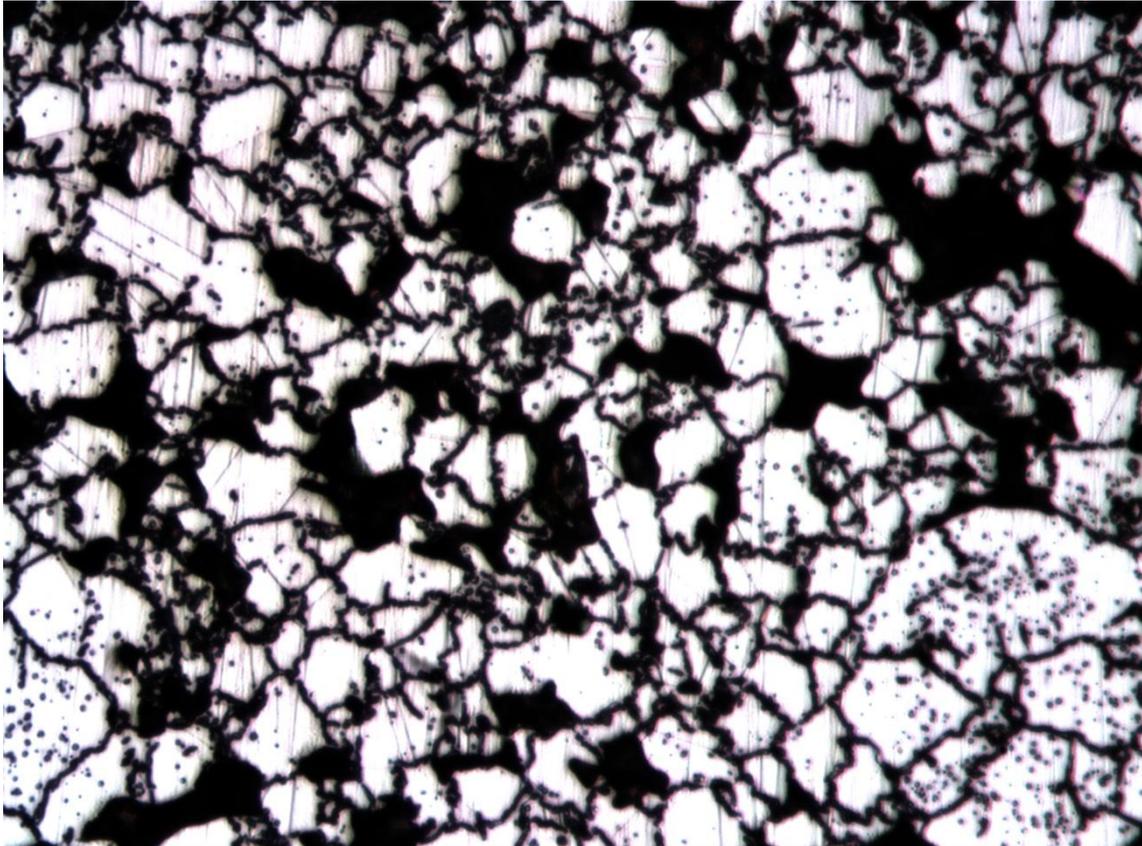
Micrografía nº 62: Capa 316L [$\frac{2}{3}$] (750 MPa) – 200 aumentos



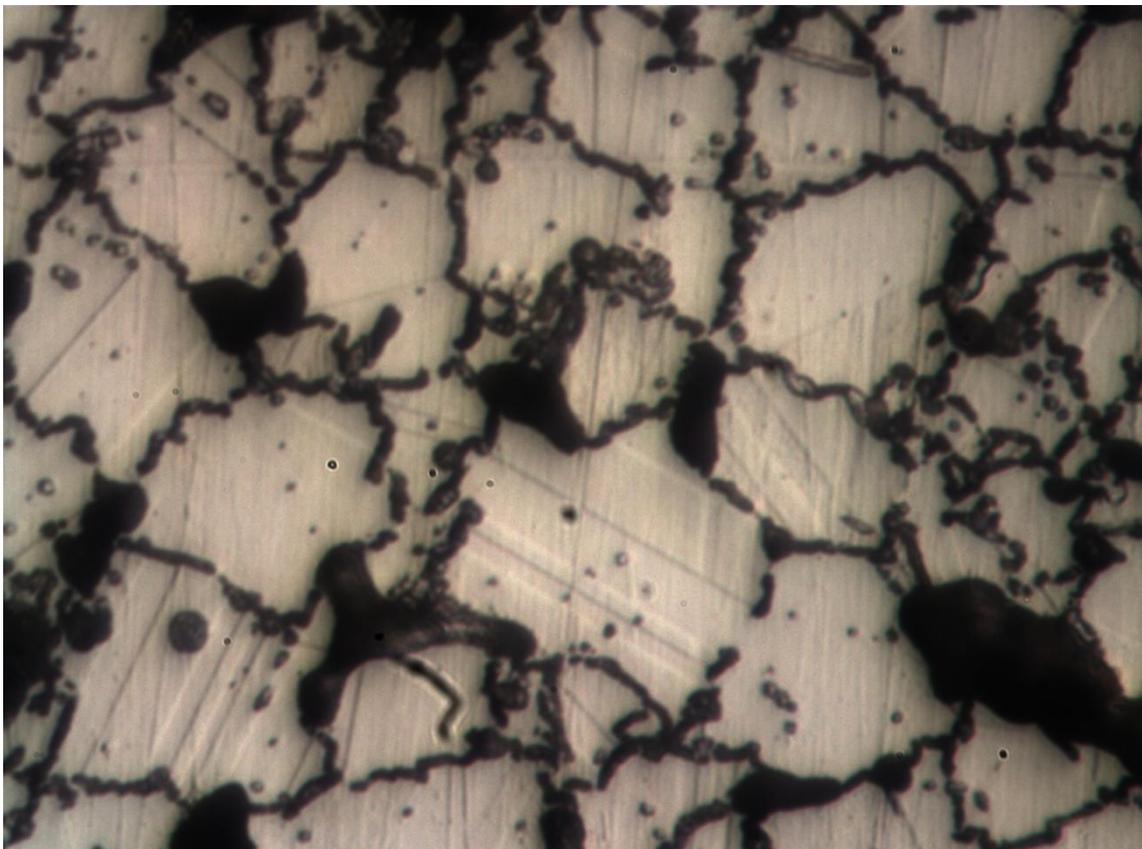
Micrografía nº 63: Capa 316L [$\frac{1}{3}$] (750 MPa) – 500 aumentos



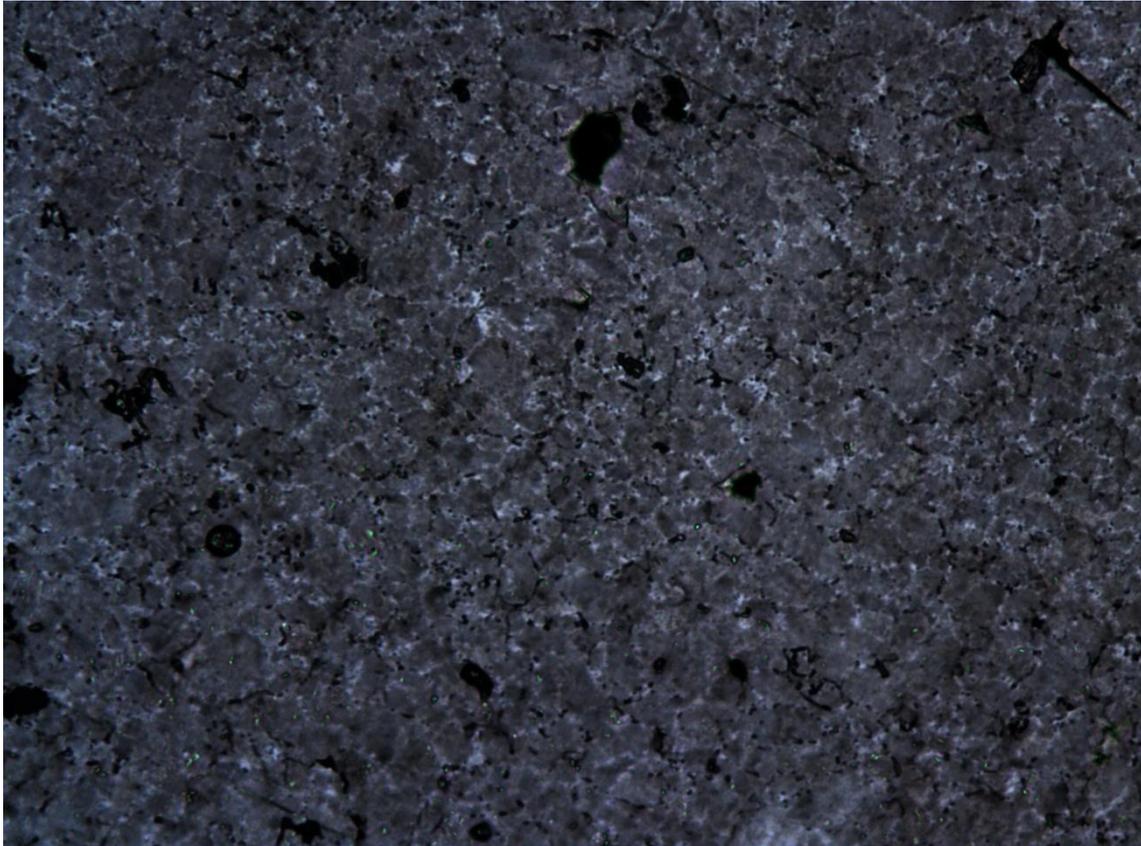
Micrografía nº 64: Capa Mezcla 316L [$\frac{1}{3}$] (750 MPa) – 100 aumentos



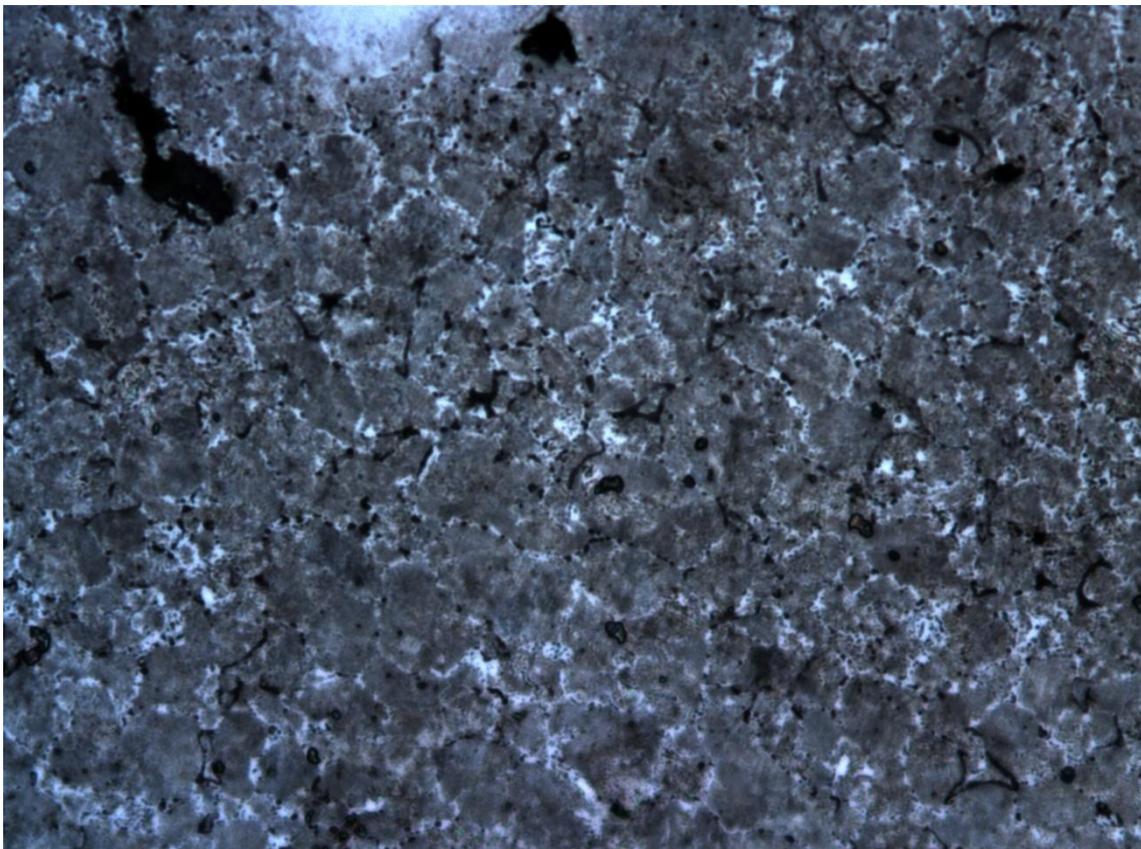
Micrografía nº 65: Capa Mezcla 316L [1/3] (750 MPa) – 200 aumentos



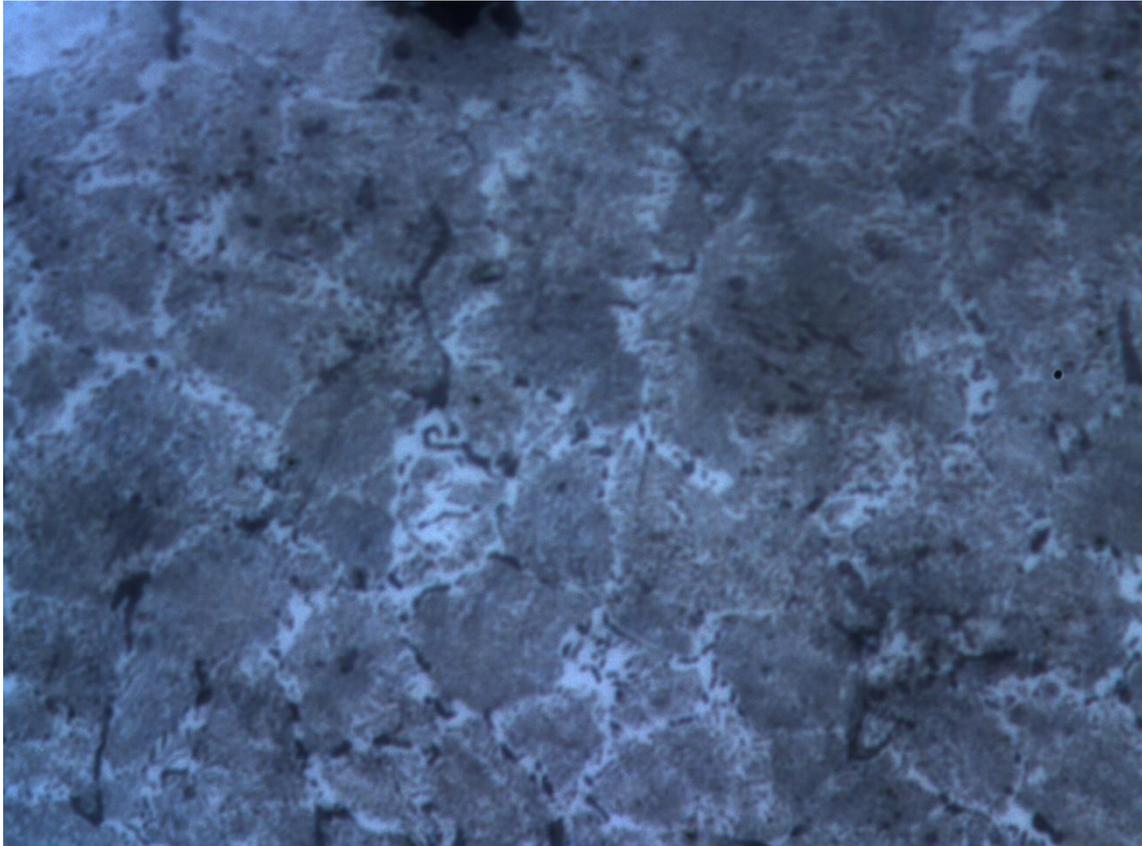
Micrografía nº 66: Capa Mezcla 316L [1/3] (750 MPa) – 500 aumentos



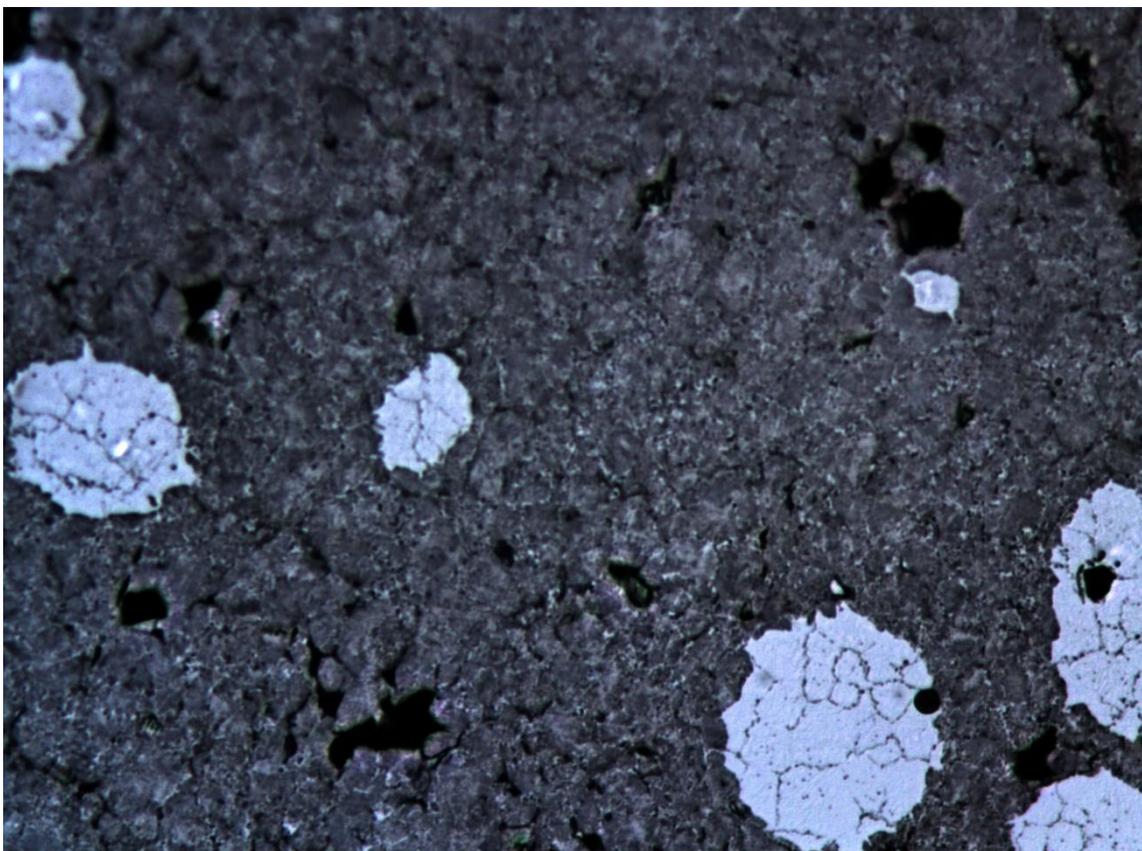
Micrografía nº 67: Capa 430L [1/2] (750 MPa) – 100 aumentos



Micrografía nº 68: Capa 430L [1/2] (750 MPa) – 200 aumentos



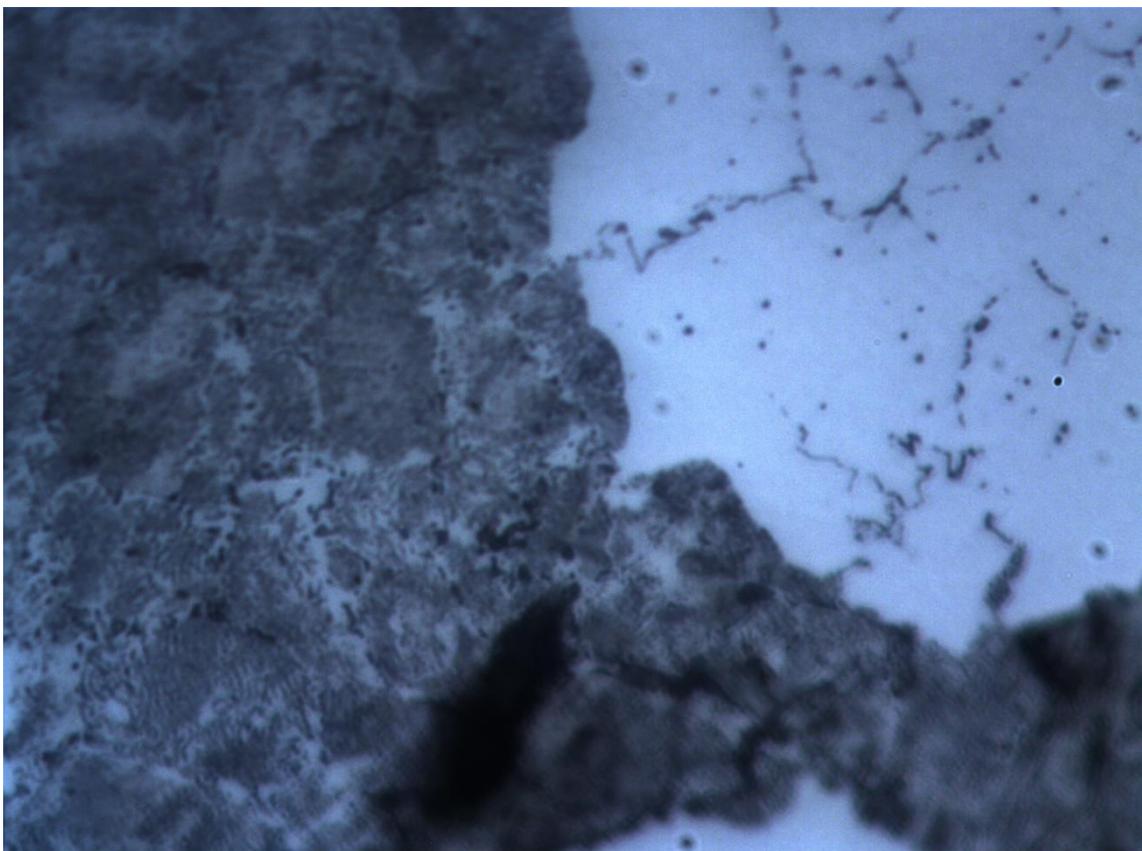
Micrografía nº 69: Capa 430L [1/2] (750 MPa) – 500 aumentos



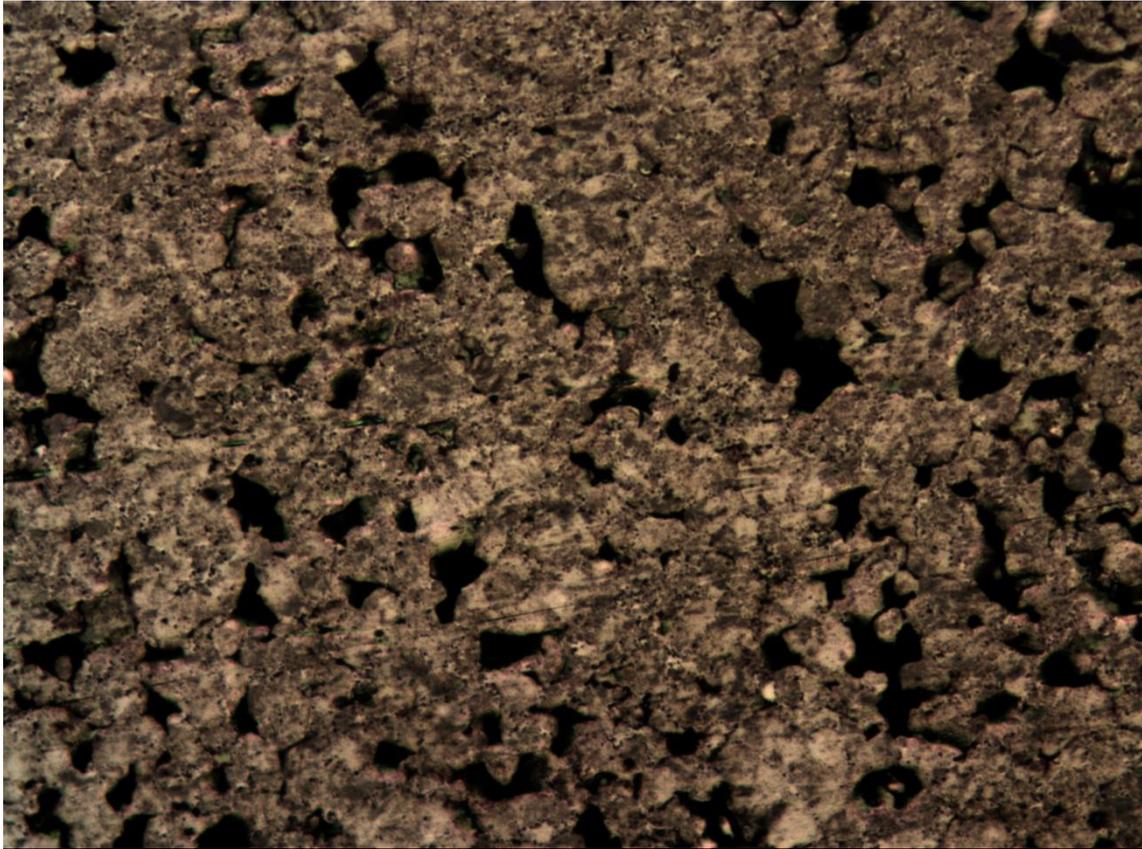
Micrografía nº 70: Capa Mezcla 430L [1/2] (750 MPa) – 100 aumentos



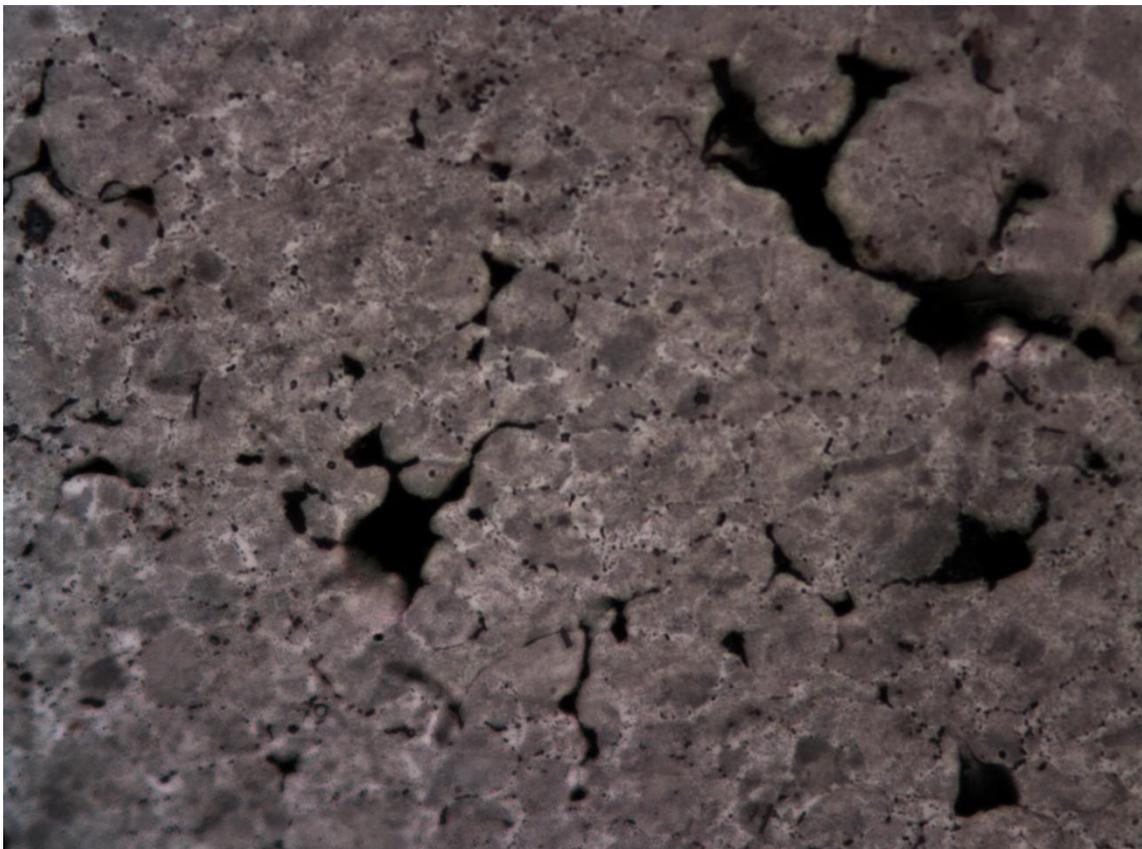
Micrografía nº 71: Capa Mezcla 430L [1/2] (750 MPa) – 200 aumentos



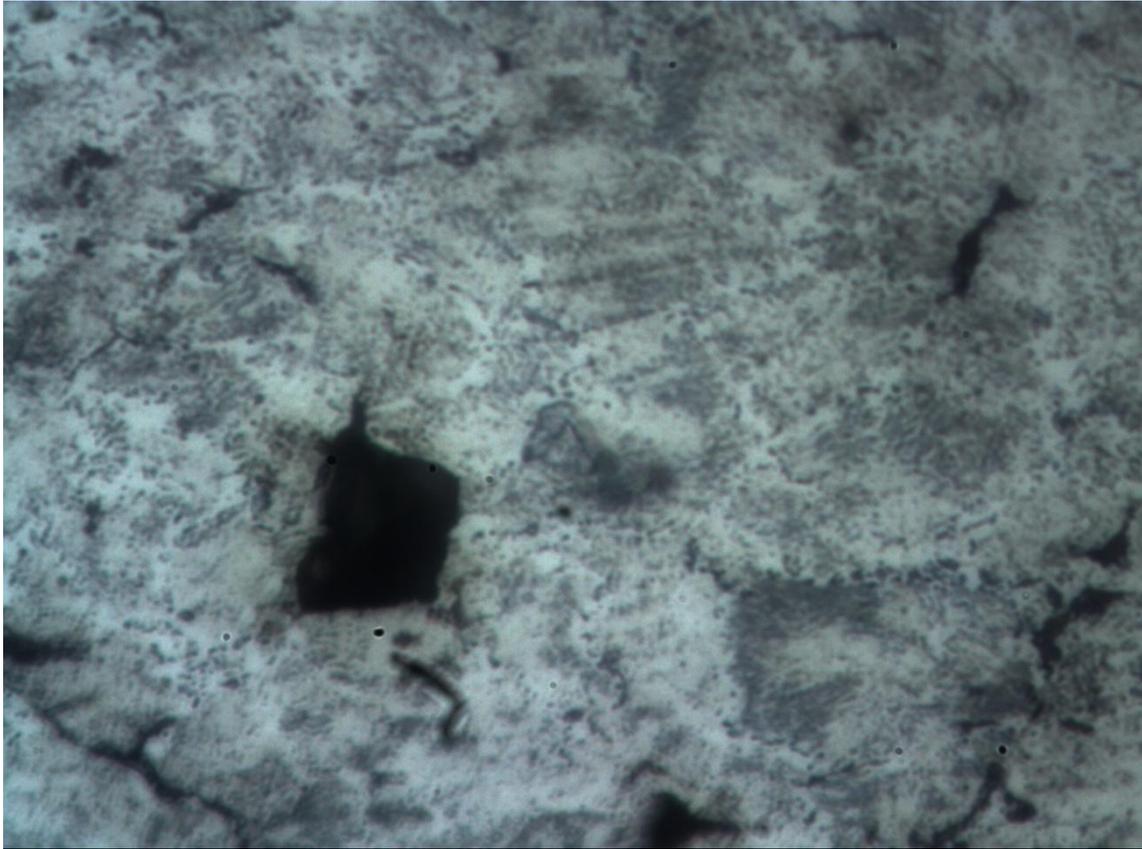
Micrografía nº 72: Capa Mezcla 430L [1/2] (750 MPa) – 500 aumentos



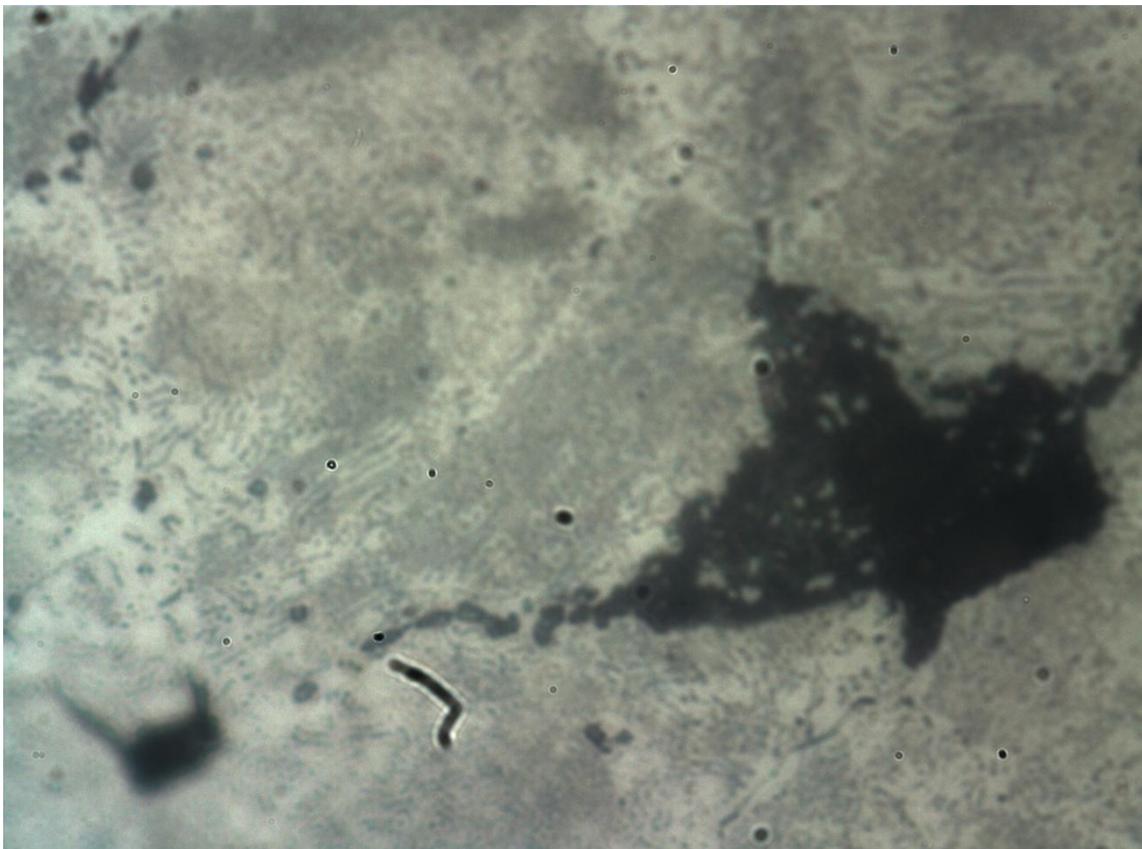
Micrografía nº 73: Capa 430L [2/3] (750 MPa) – 100 aumentos



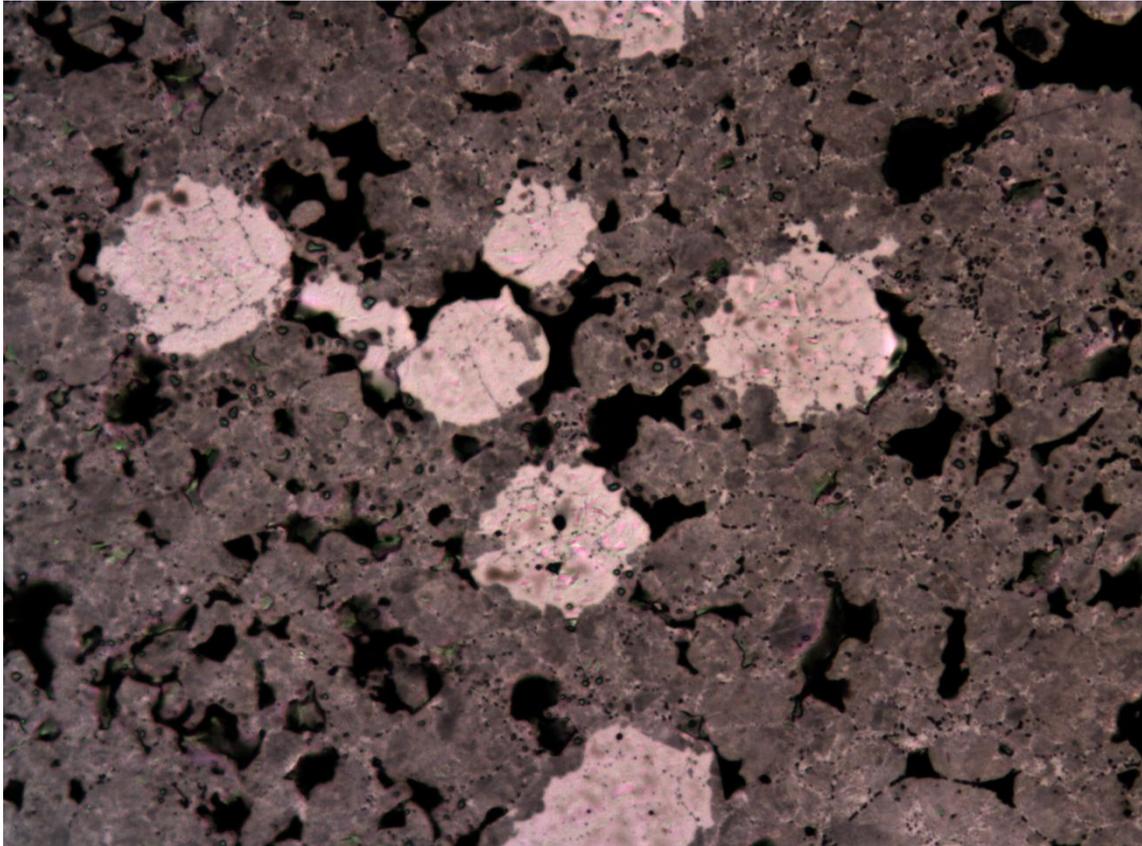
Micrografía nº 74: Capa 430L [2/3] (750 MPa) – 200 aumentos



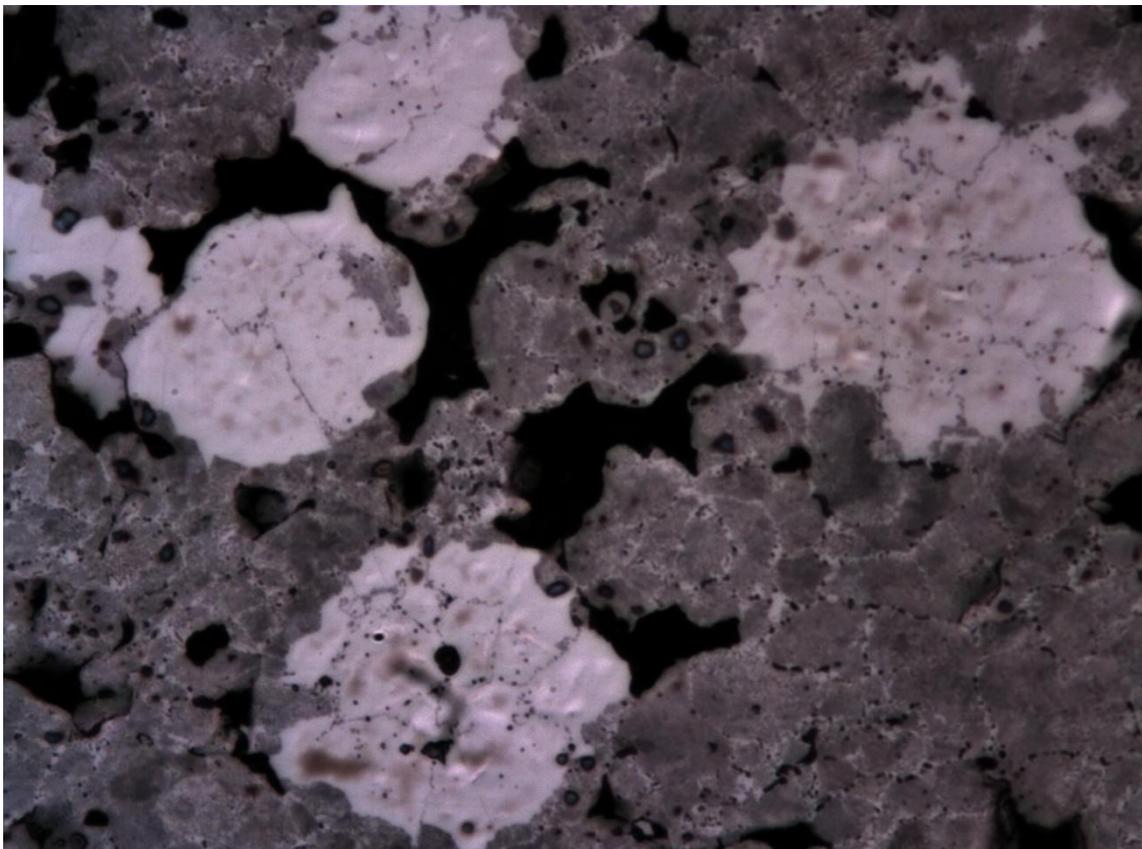
Micrografía nº 75: Capa 430L [$\frac{2}{3}$] (750 MPa) – 500 aumentos



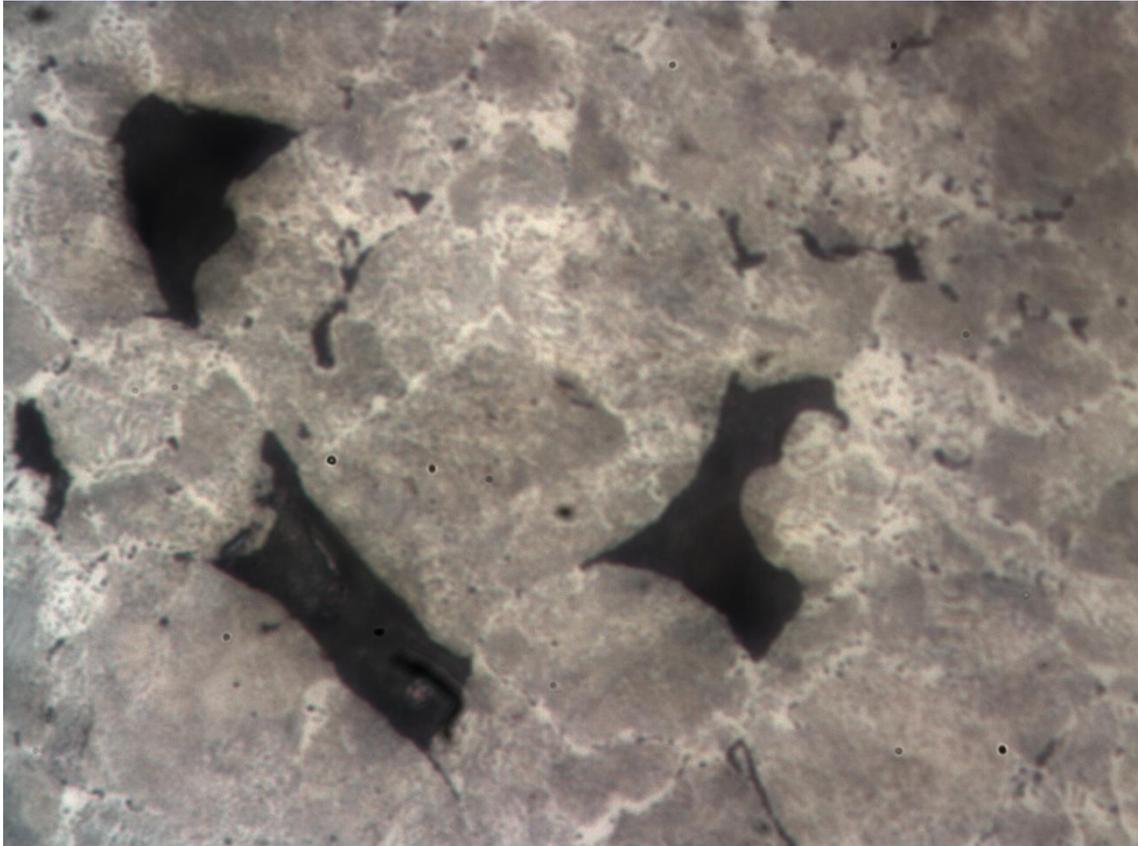
Micrografía nº 76: Capa 430L [$\frac{2}{3}$] (750 MPa) – 1000 aumentos



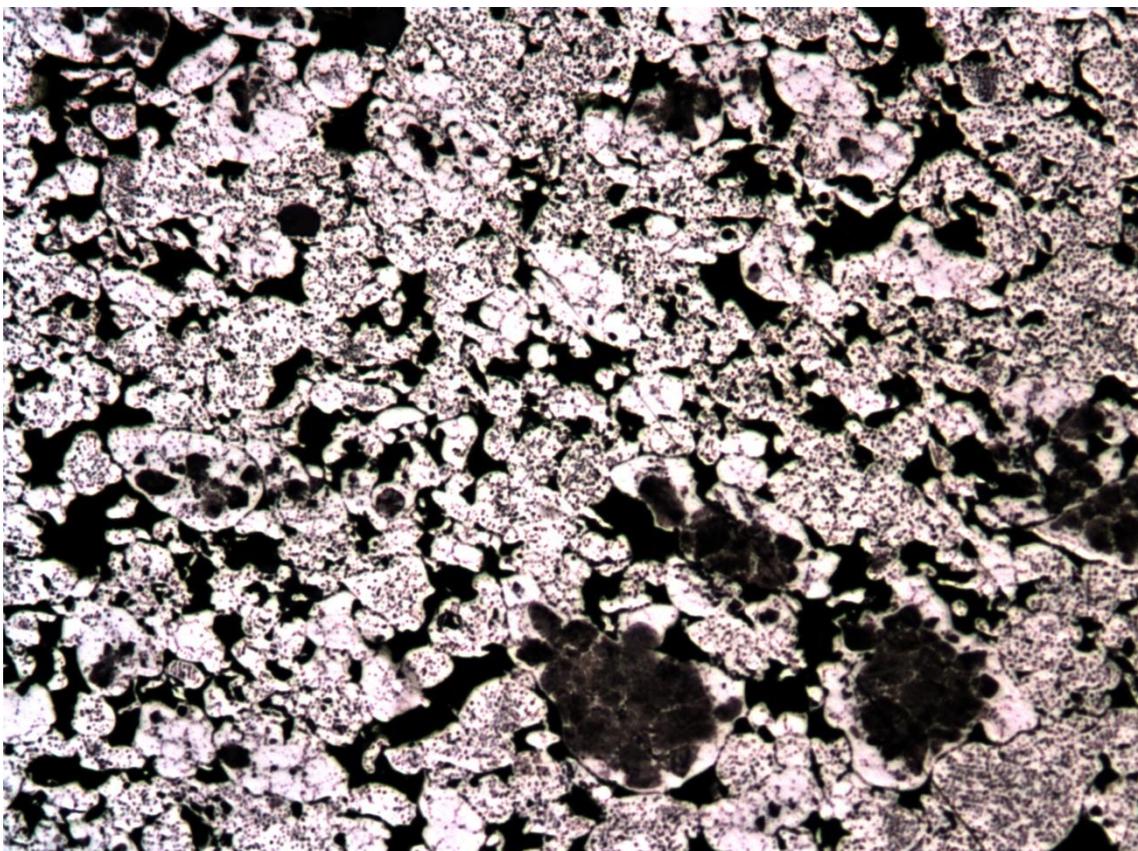
Micrografía n° 77: Capa Mezcla 430L [1/3] (750 MPa) – 100 aumentos



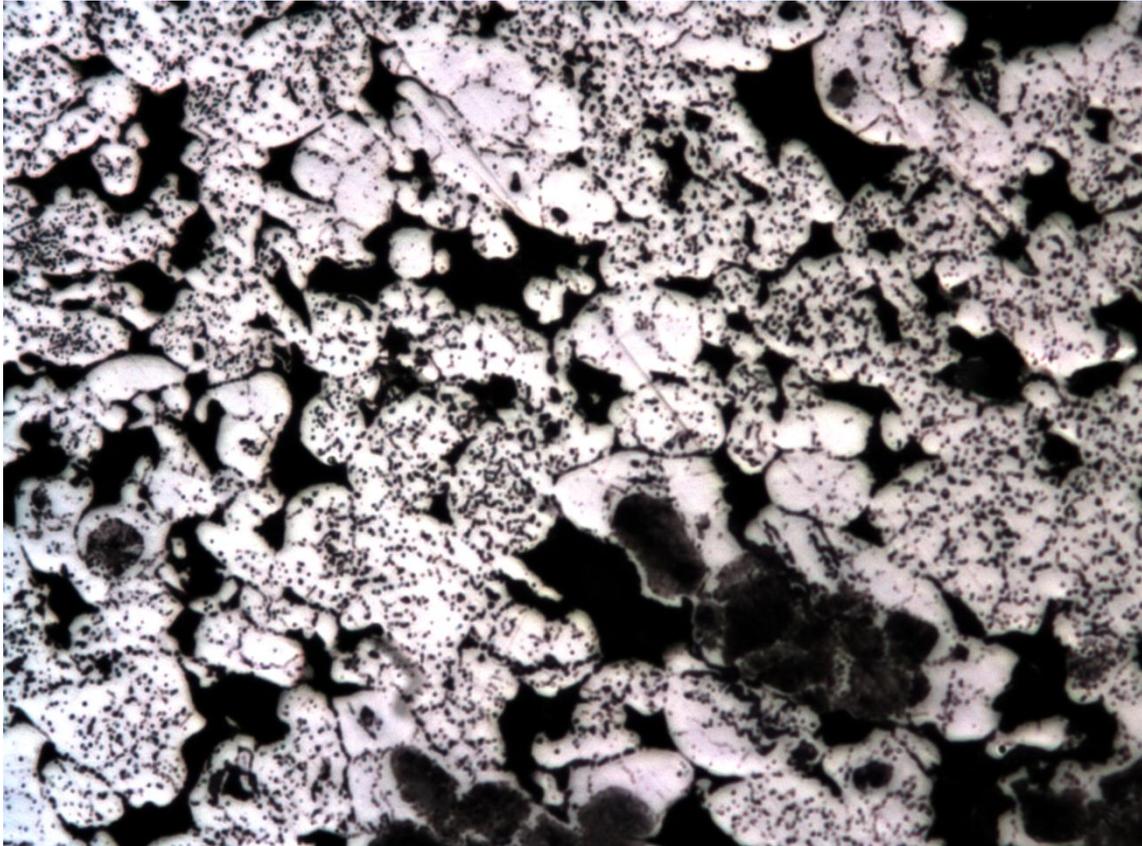
Micrografía n° 78: Capa Mezcla 430L [1/3] (750 MPa) – 200 aumentos



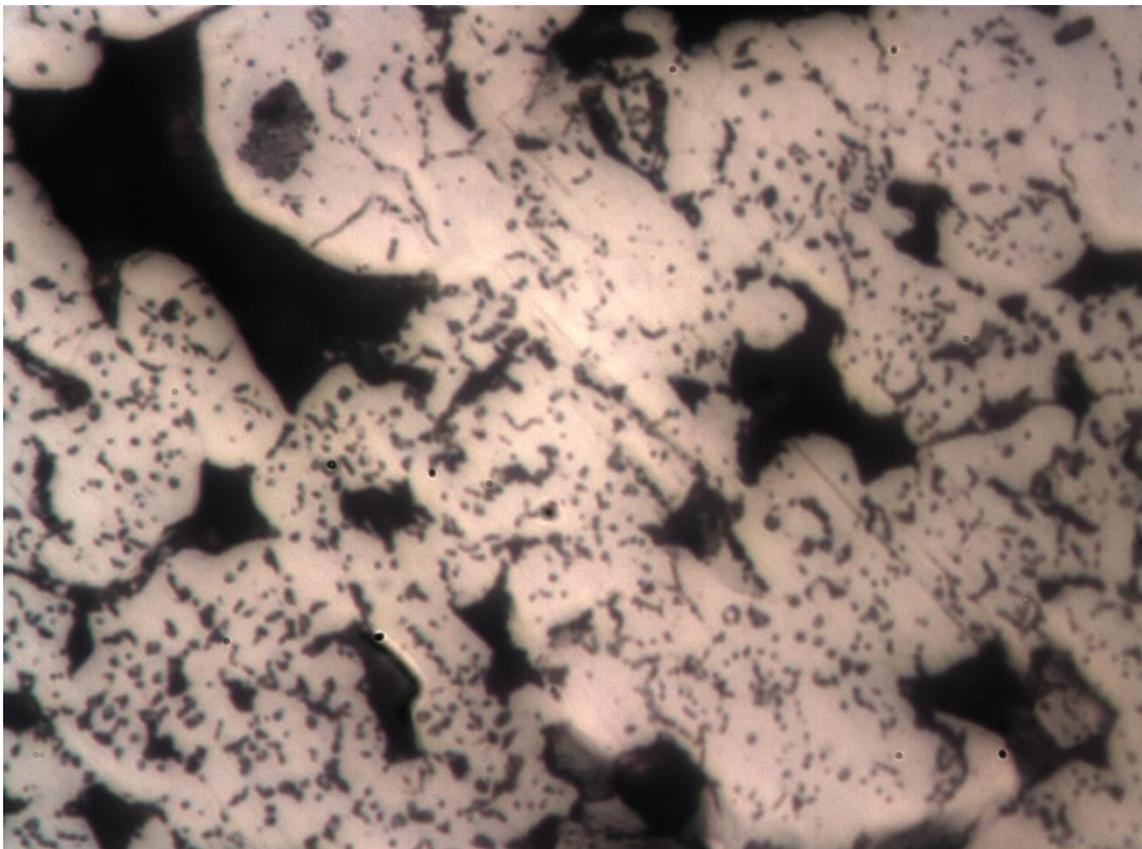
Micrografía n° 79: Capa Mezcla 430L [$\frac{1}{3}$] (750 MPa) – 500 aumentos



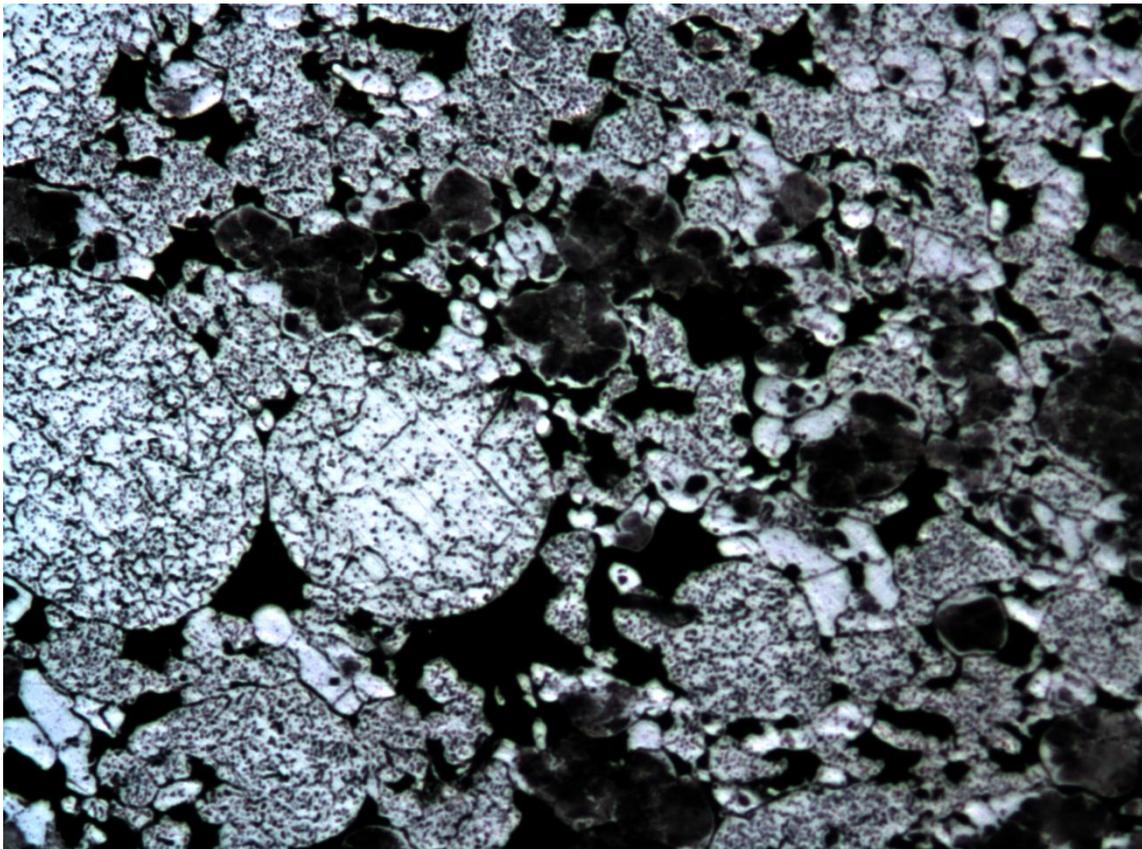
Micrografía n° 80: Capa 50/50 [$\frac{2}{3}$] (750 MPa) – 100 aumentos



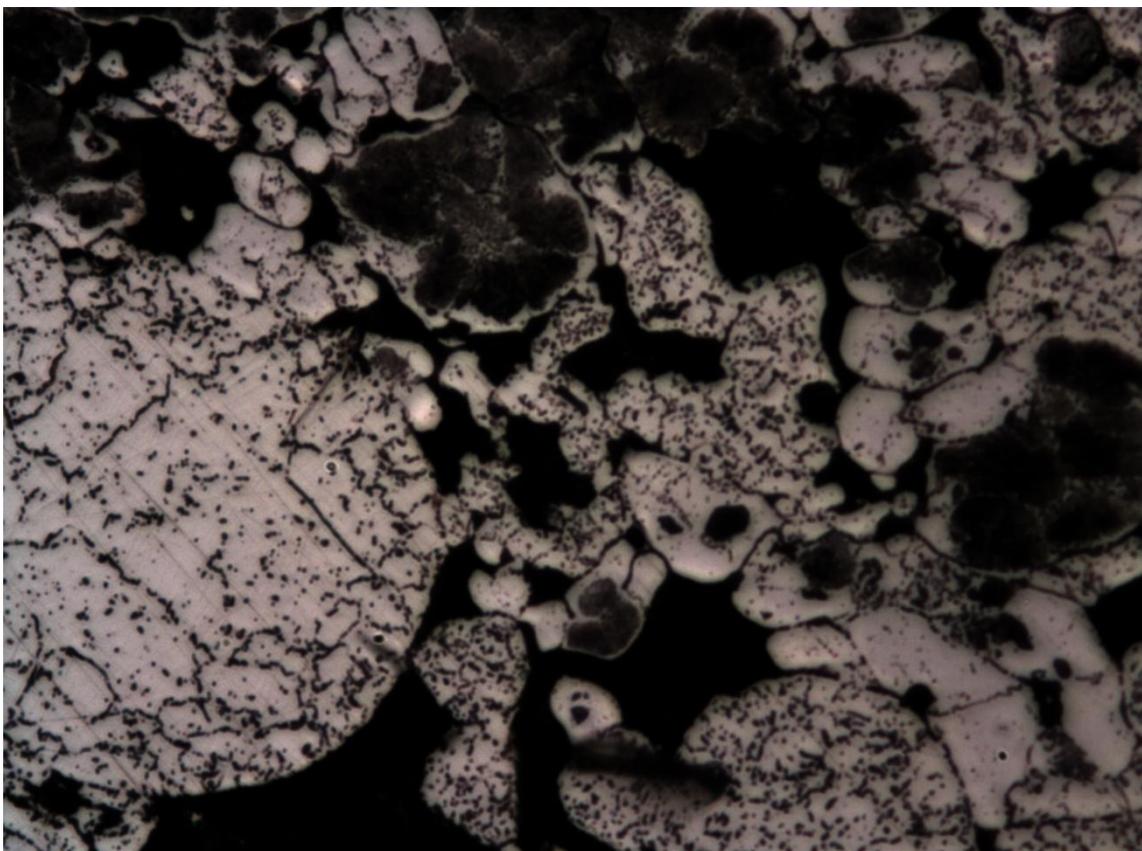
Micrografía nº 81: Capa 50/50 [3/3] (750 MPa) – 200 aumentos



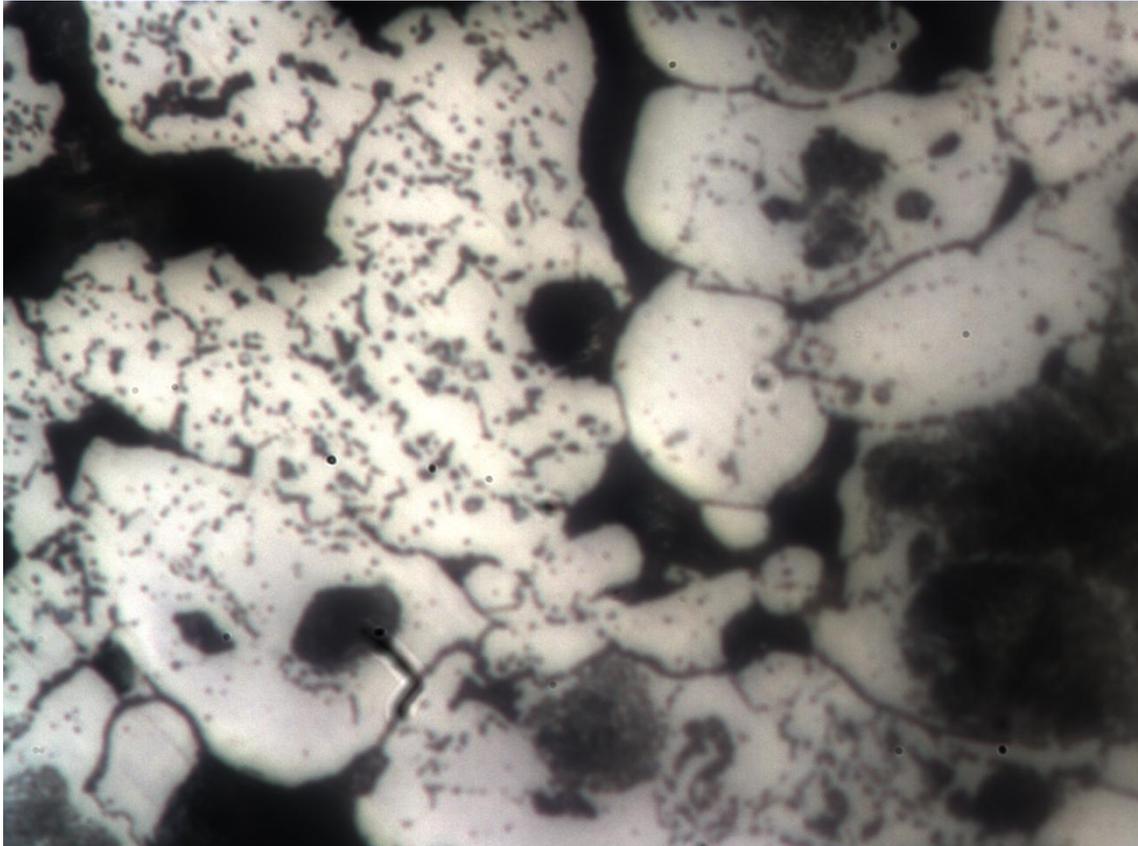
Micrografía nº 82: Capa 50/50 [3/3] (750 MPa) – 500 aumentos



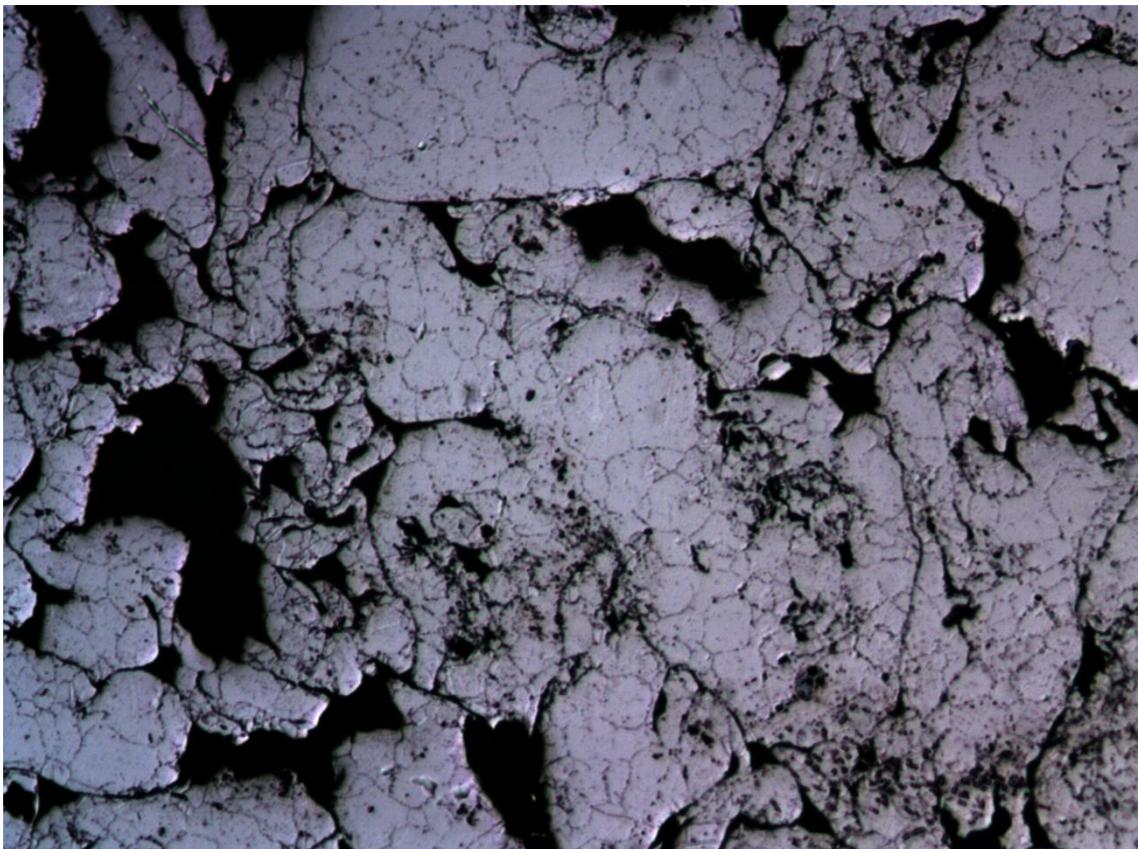
Micrografía nº 83: Capa Mezcla 50/50 [1/3] (750 MPa) – 100 aumentos



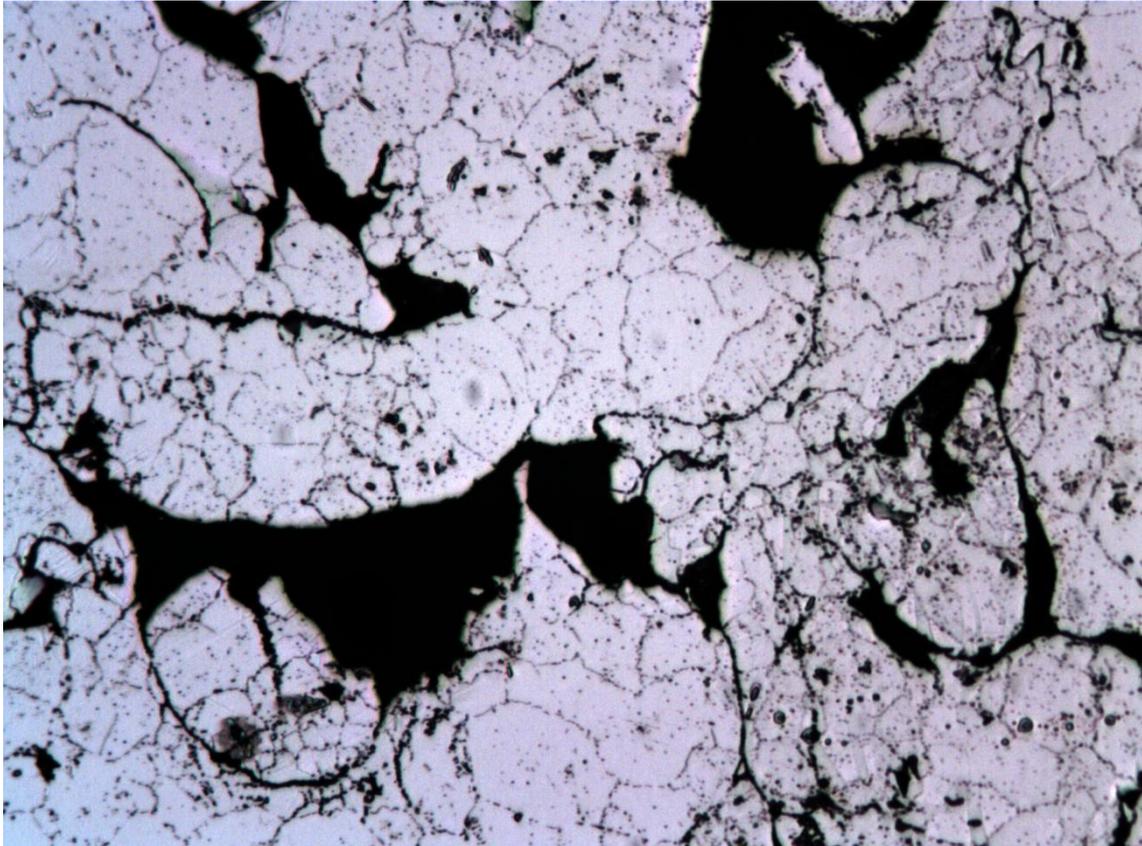
Micrografía nº 84: Capa Mezcla 50/50 [1/3] (750 MPa) – 200 aumentos



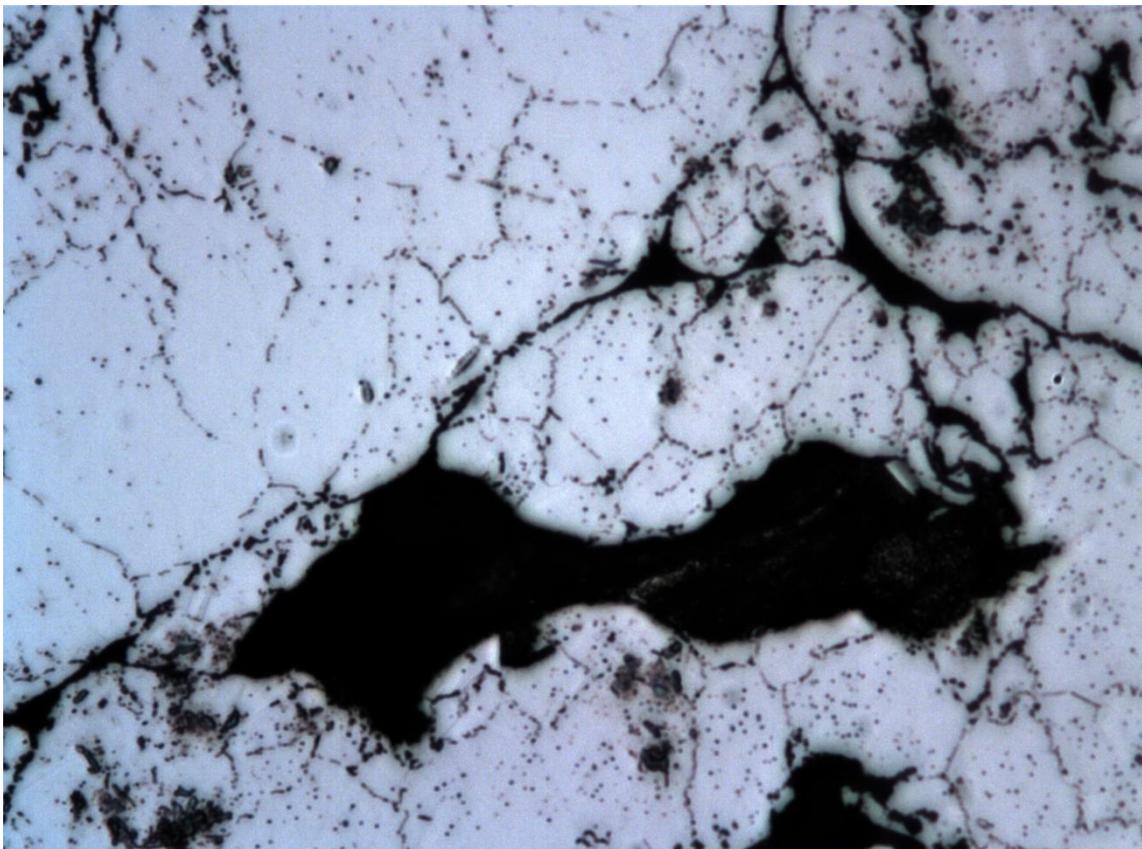
Micrografía nº 85: Capa Mezcla 50/50 [$\frac{1}{3}$] (750 MPa) – 500 aumentos



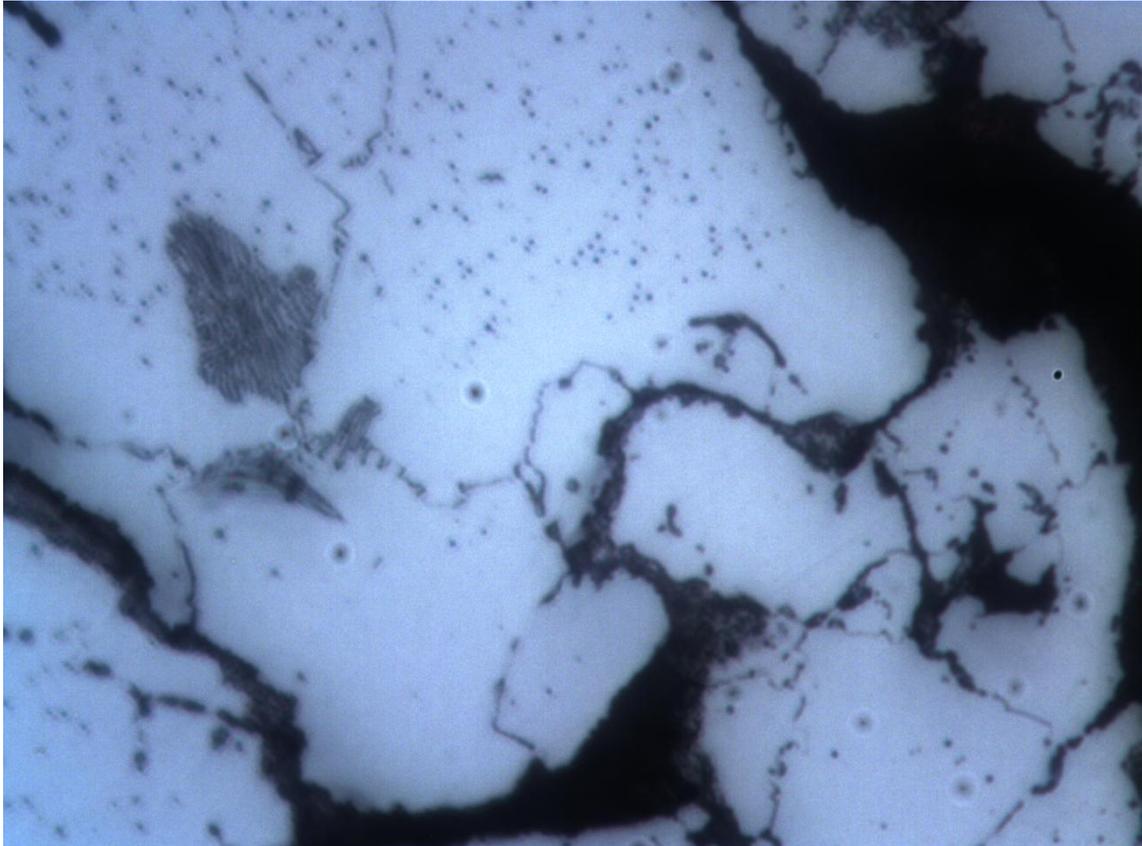
Micrografía nº 86: Capa 316L [300-500 μm] [$\frac{1}{2}$] (550 MPa) – 50 aumentos



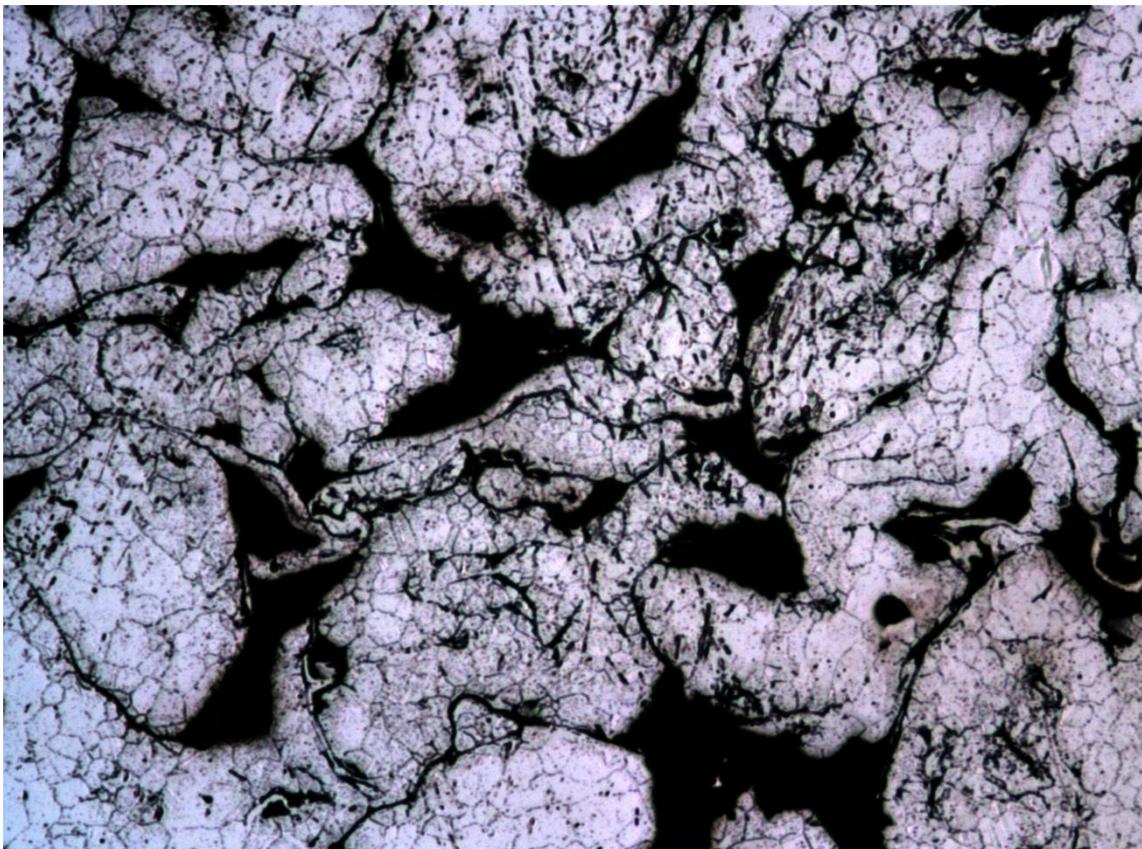
Micrografía nº 87: Capa 316L [300-500 μm] [$\frac{1}{2}$] (550 MPa) – 100 aumentos



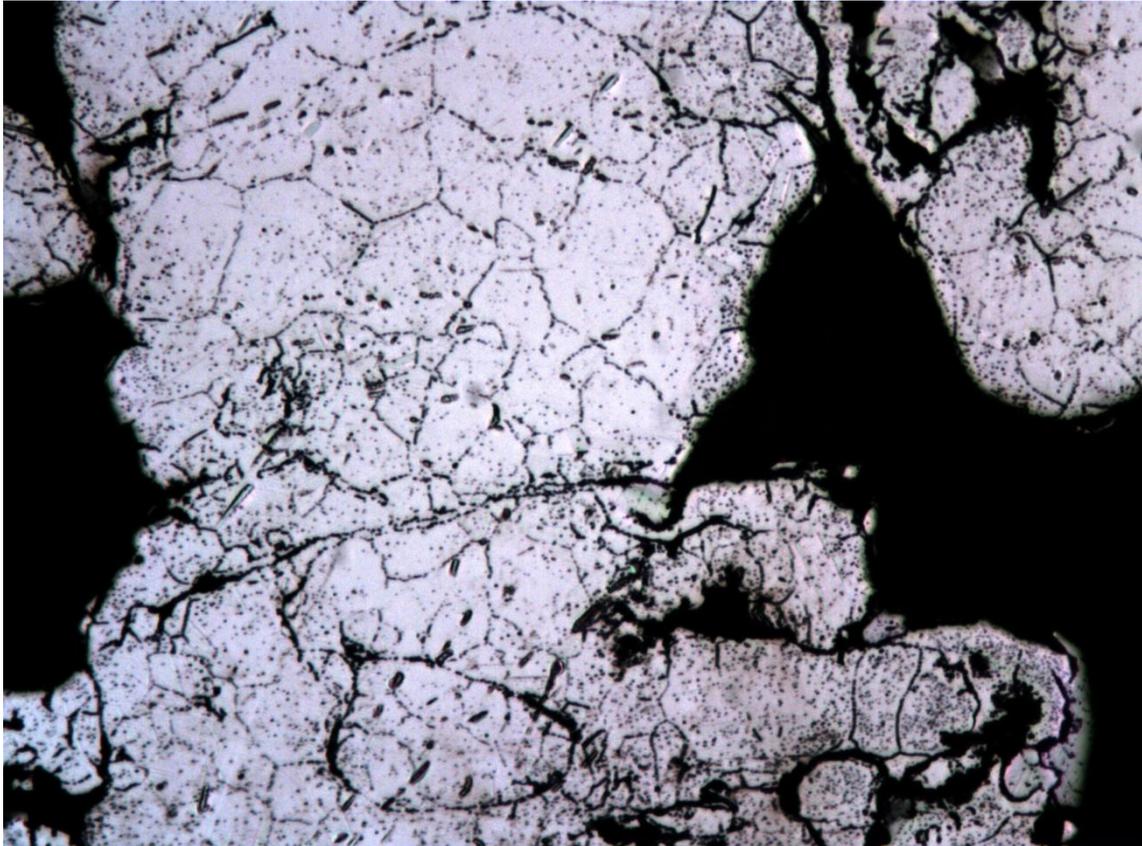
Micrografía nº 88: Capa 316L [300-500 μm] [$\frac{1}{2}$] (550 MPa) – 200 aumentos



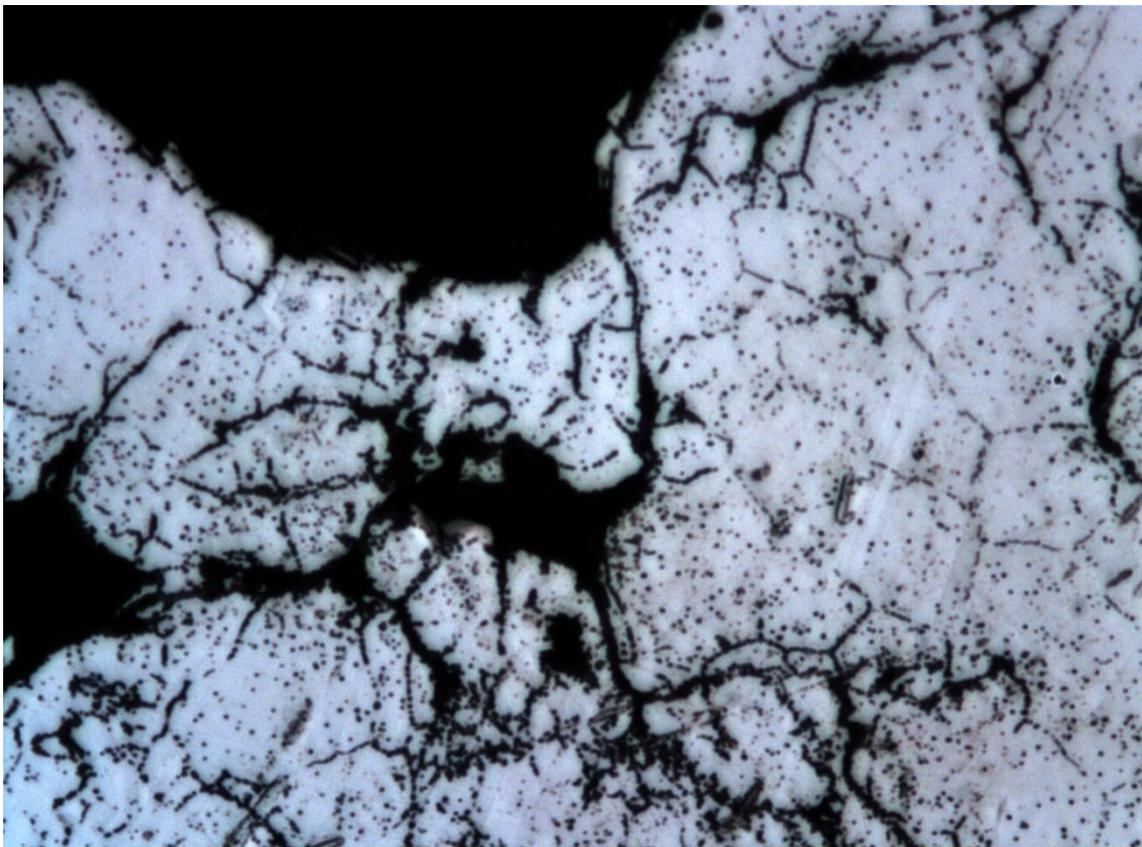
Micrografía nº 89: Capa 316L [300-500 μm] [$\frac{1}{2}$] (550 MPa) – 500 aumentos



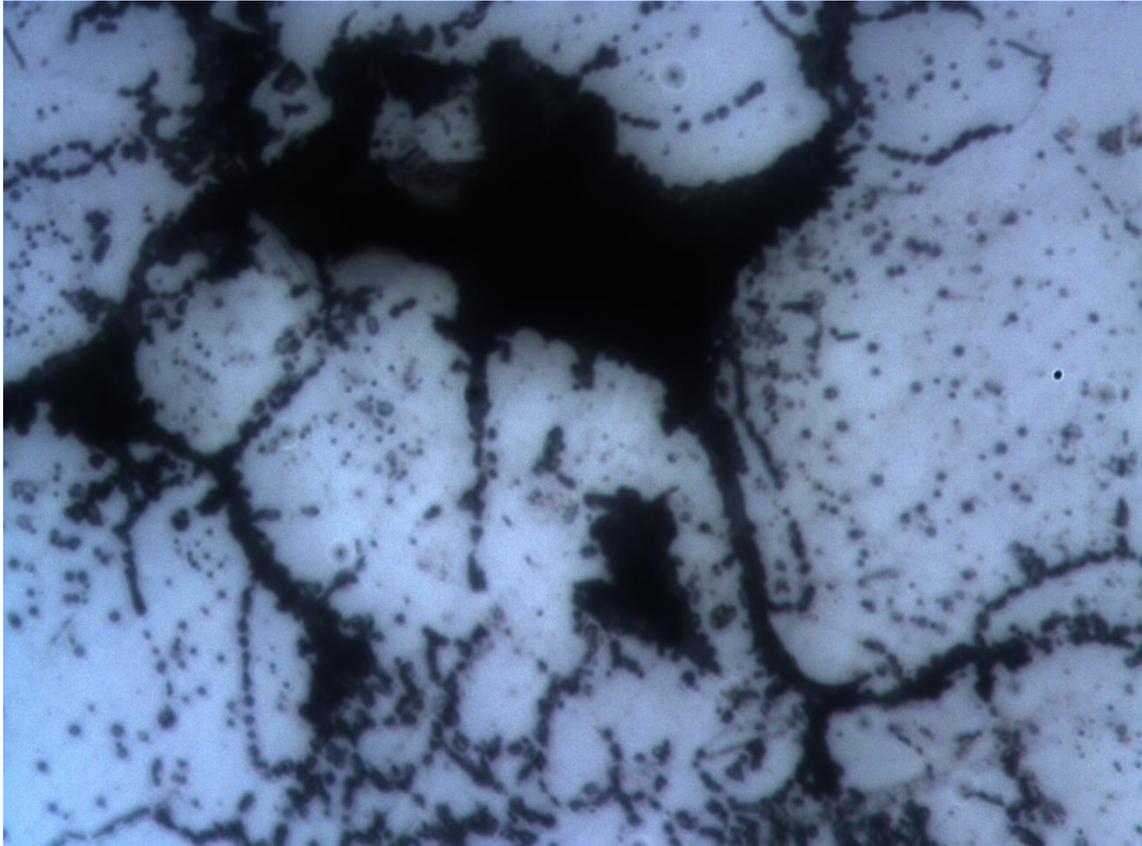
Micrografía nº 90: Capa 316L [500-710 μm] [$\frac{1}{2}$] (550 MPa) – 50 aumentos



Micrografía nº 91: Capa 316L [500-710 μm] [$\frac{1}{2}$] (550 MPa) – 100 aumentos



Micrografía nº 92: Capa 316L [500-710 μm] [$\frac{1}{2}$] (550 MPa) – 200 aumentos



Micrografía n° 93: Capa 316L [500-710 μm] [$\frac{1}{2}$] (550 MPa) – 500 aumentos



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

PROYECTO FIN DE CARRERA



Anexo 3

Comportamiento tribológico: Ensayo de desgaste seco



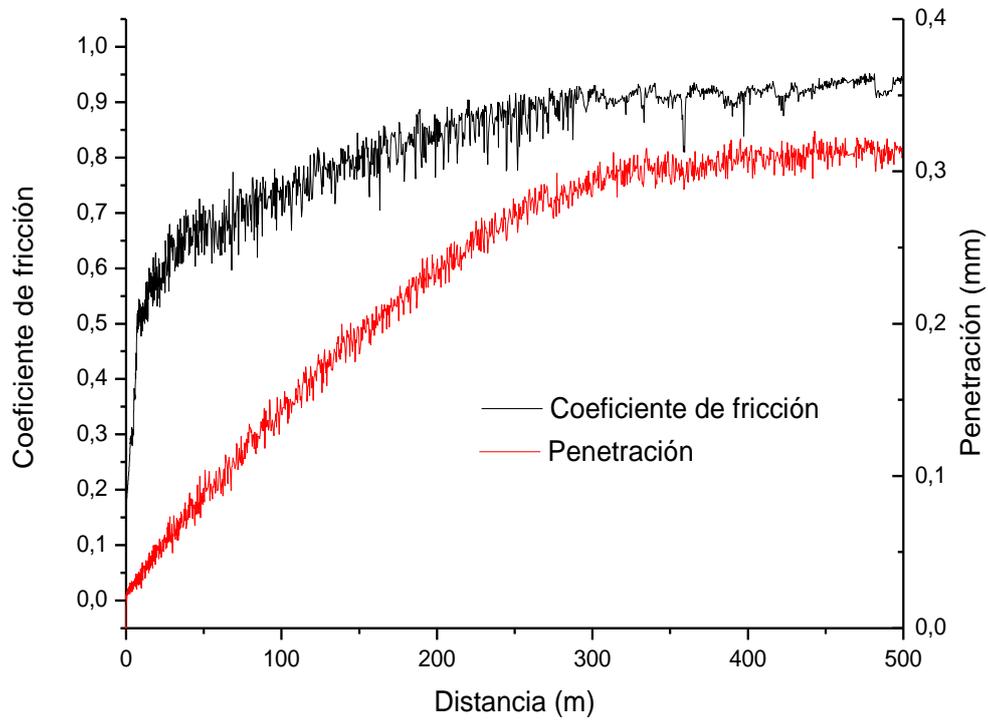
Universidad de Valladolid



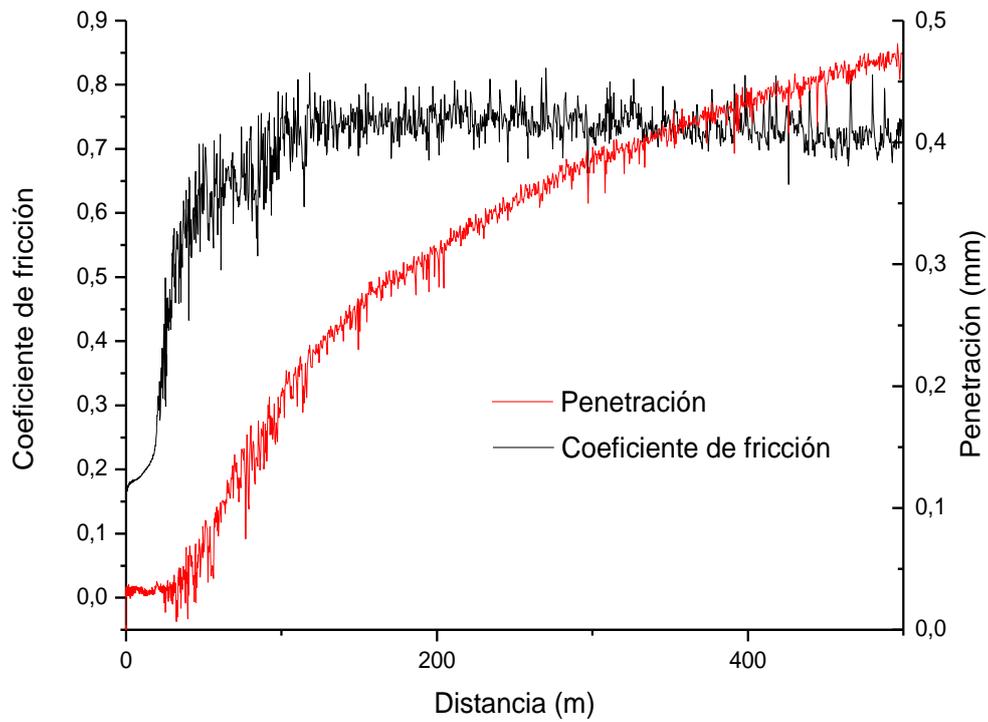
ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

PROYECTO FIN DE CARRERA

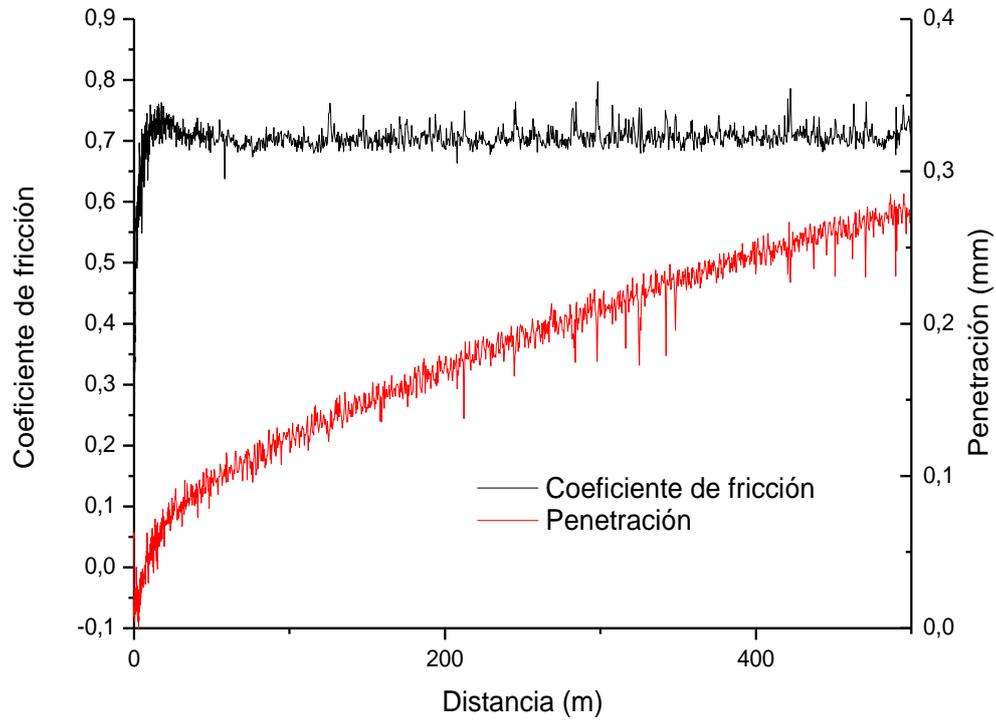
430L (750 MPa) - 10N



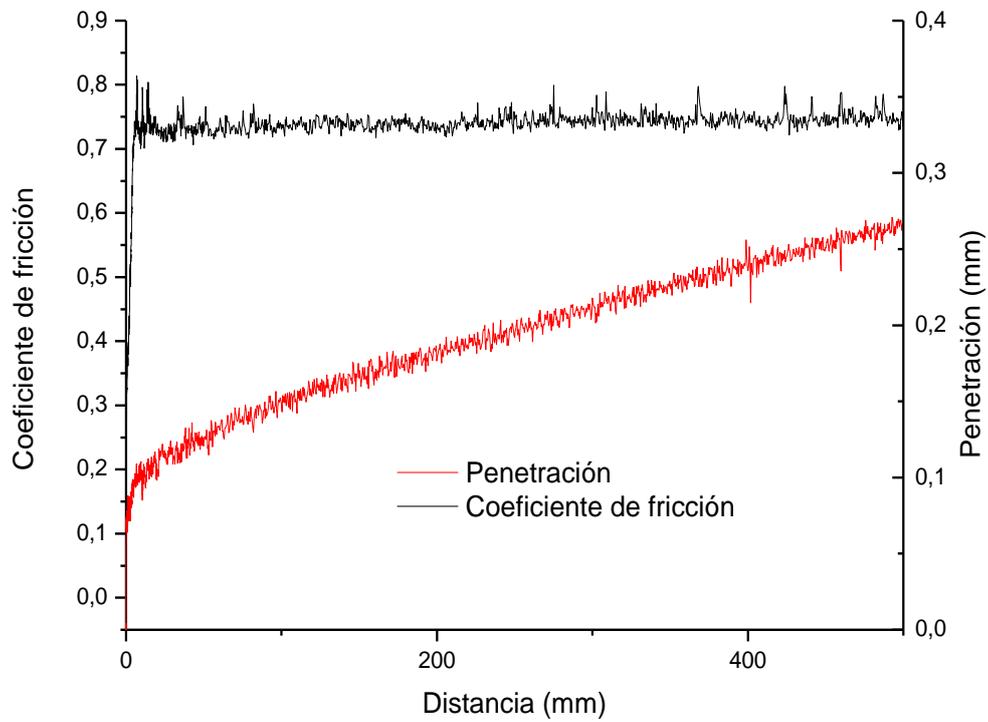
316L (550 MPa) - 10N



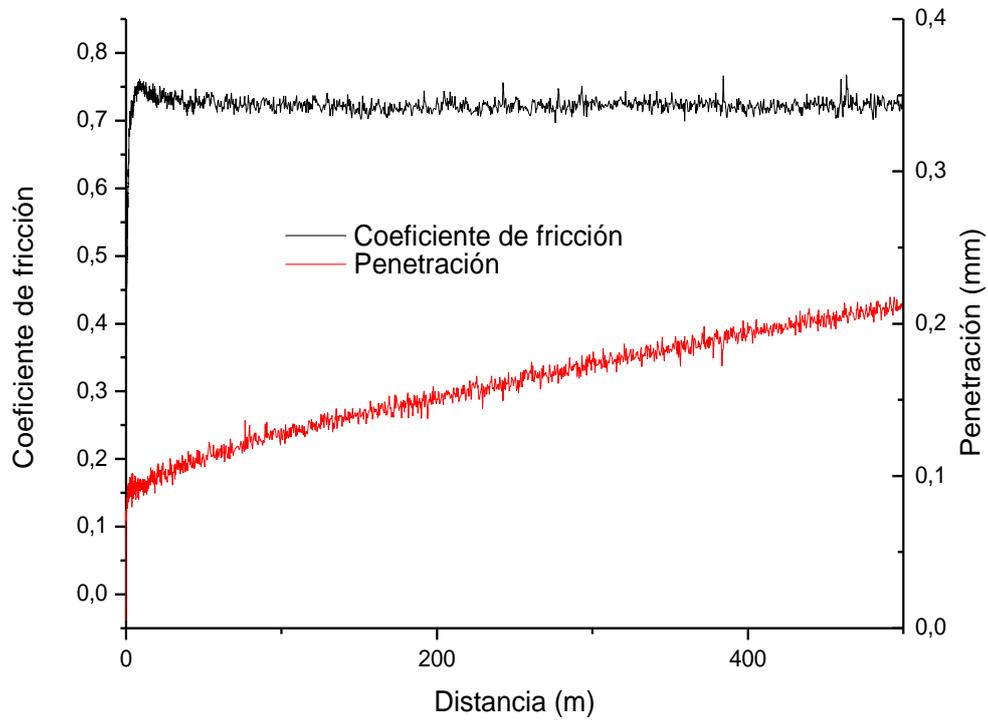
316L (750 MPa) - 10N



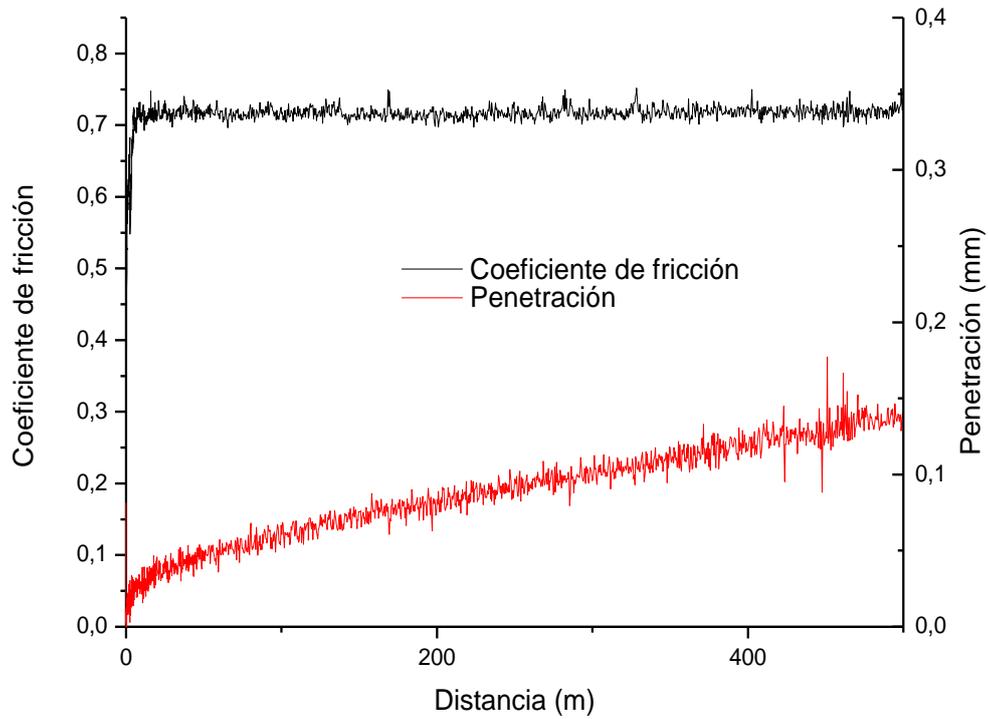
316L [300-500 μm] (550 MPa) - 10N



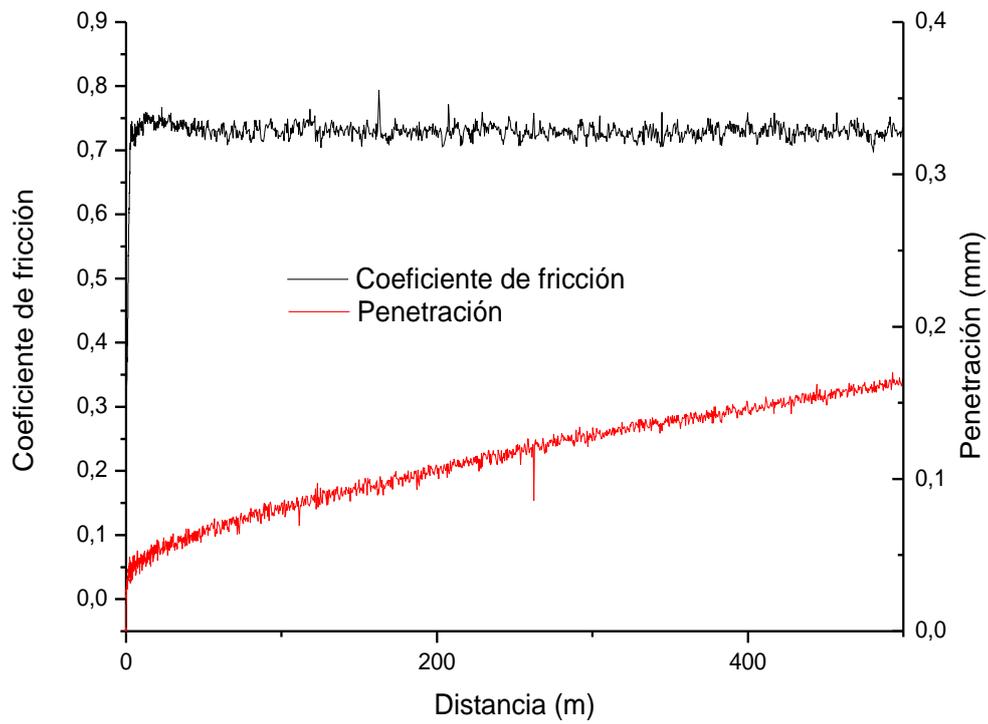
316L [300-500 μm] (750 MPa) - 10N



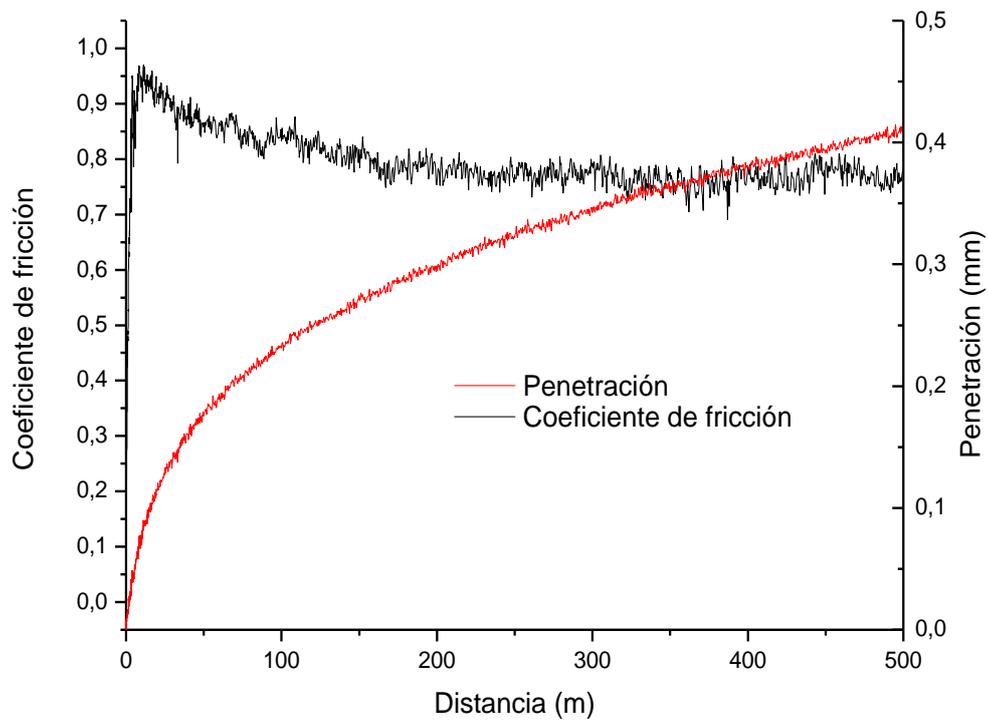
316L [500-710 μm] (550 MPa) - 10N



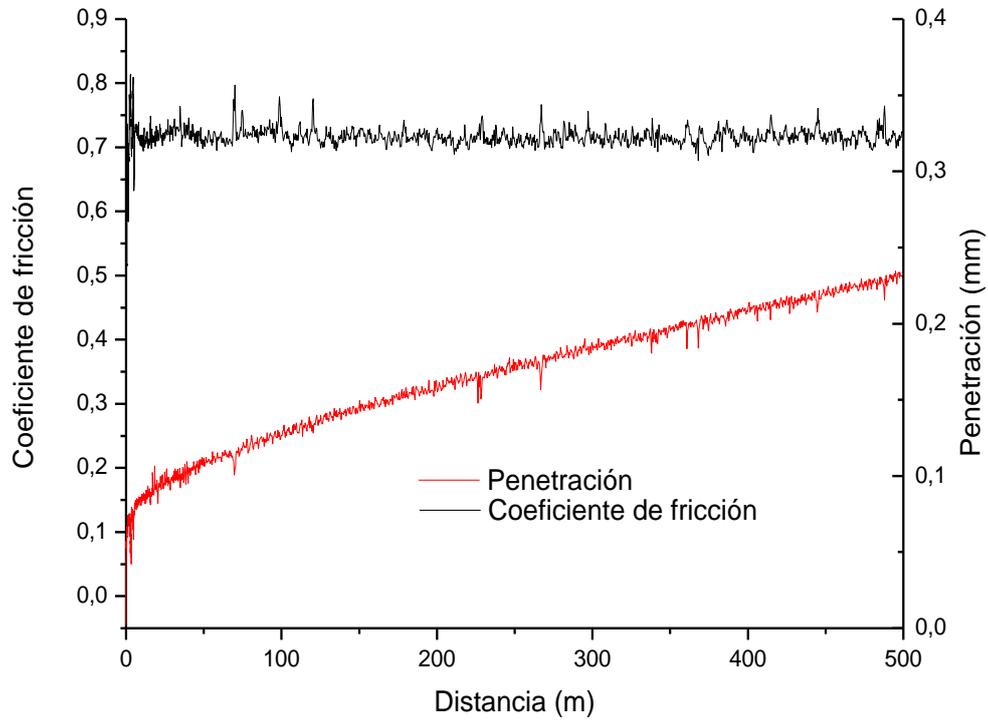
316L [500-710 μm] (750 MPa) - 10N



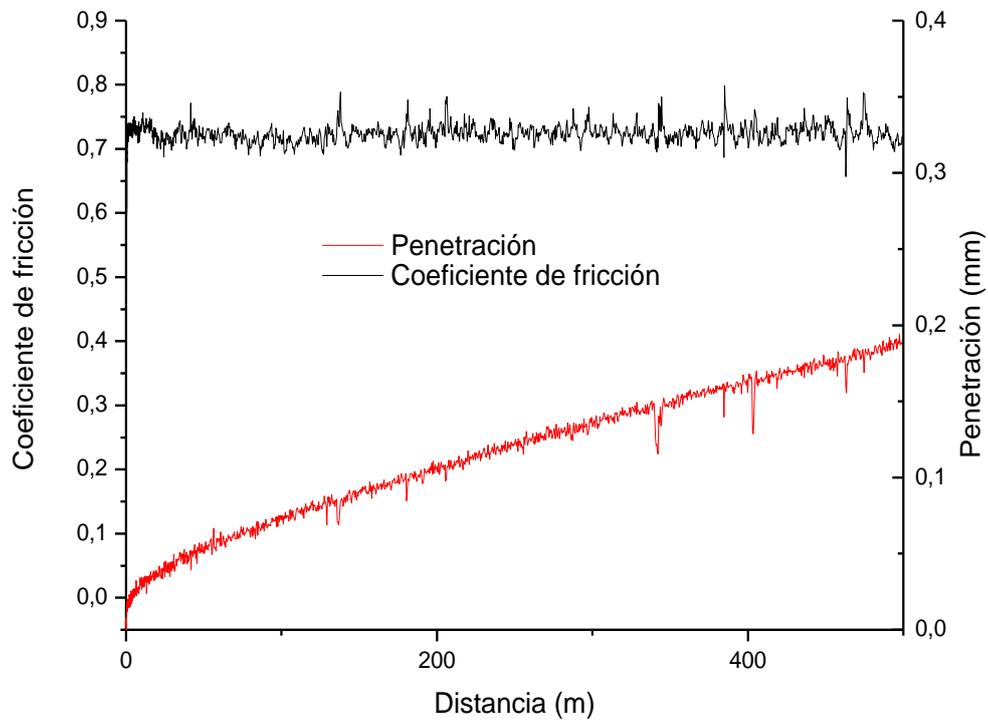
Dúplex 50/50 (750 MPa) - 10N



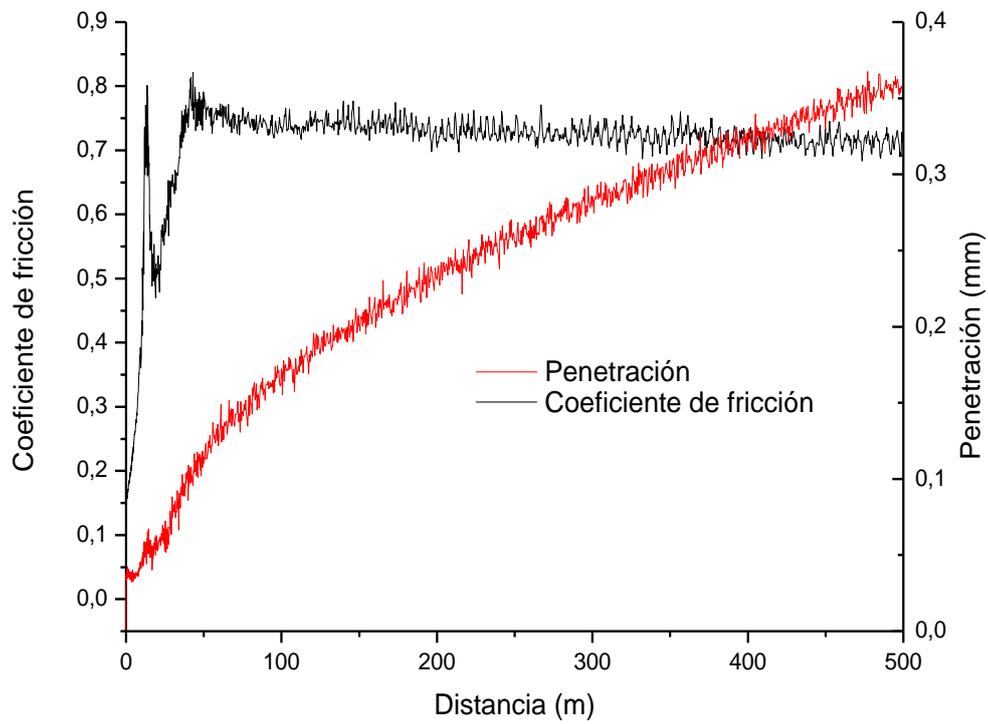
Mezcla Austenítica (550 MPa) - 10N



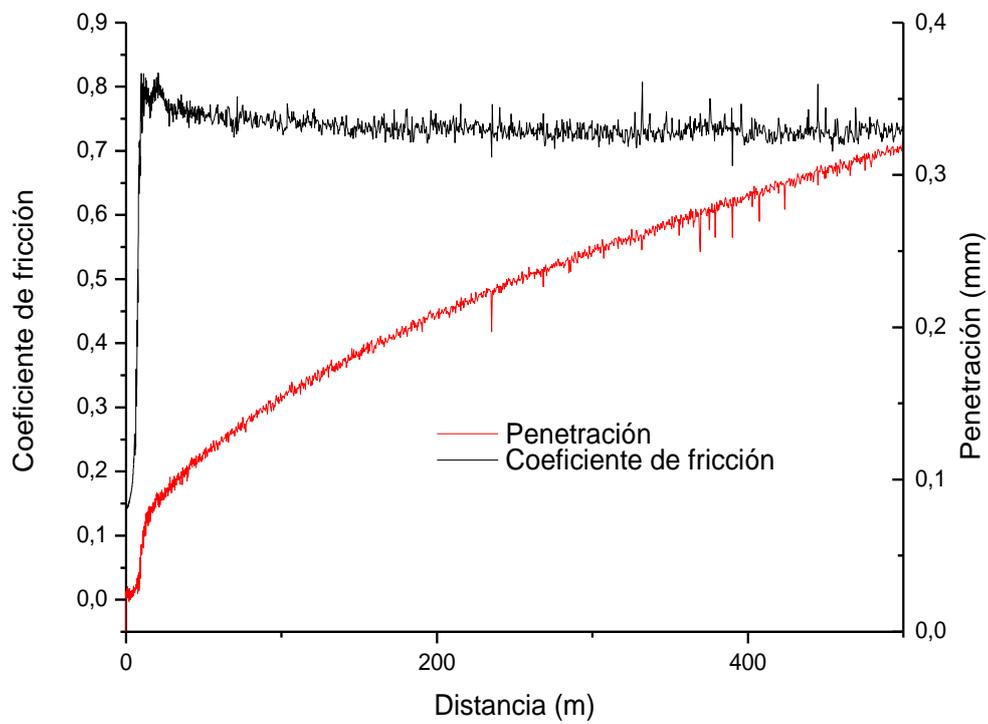
Mezcla Austenítica (750 MPa) - 10N



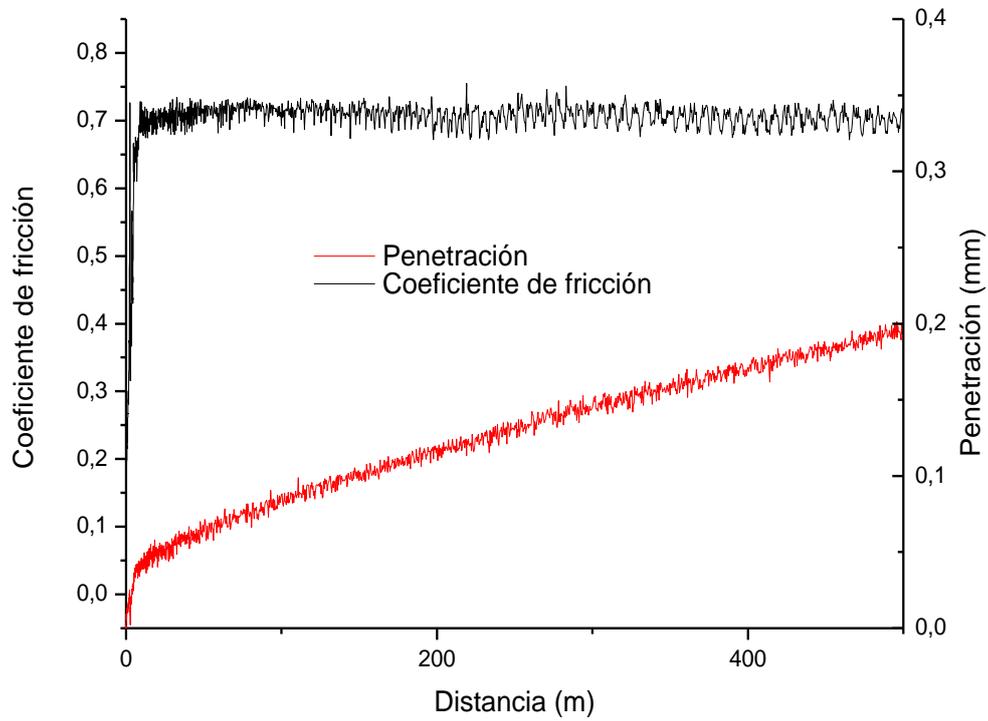
Bicapa 316L [½-½] (550 MPa): Capa 316L [½] - 10 N



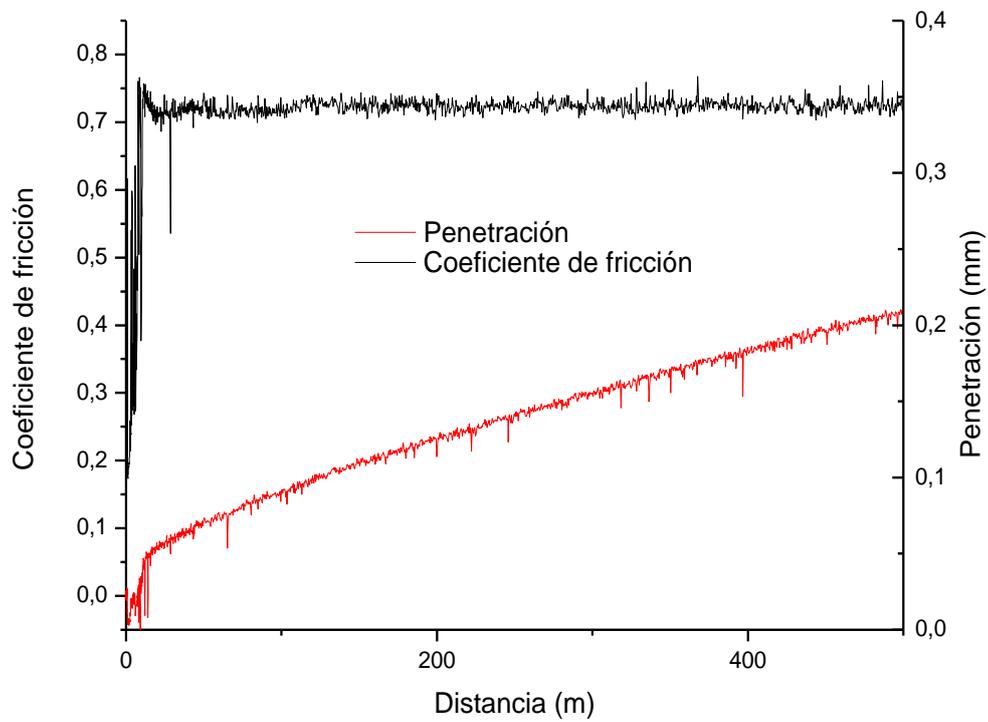
Bicapa 316L [½-½] (550 MPa): Capa Mezcla 316L [½] - 10 N



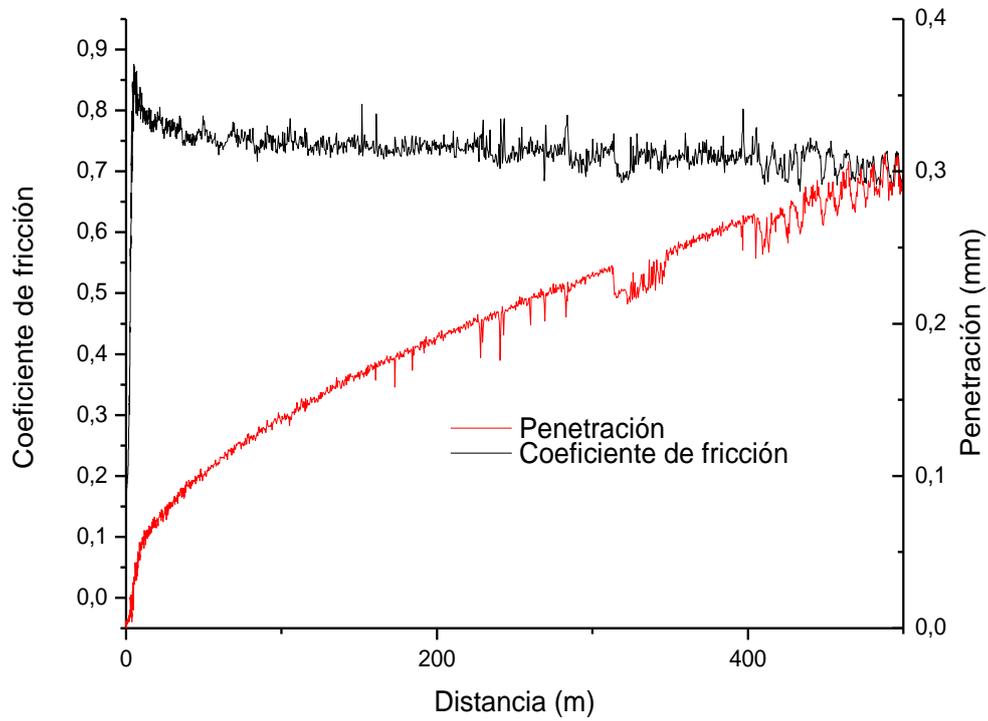
Bicapa 316L [½-½] (750 MPa): Capa 316L [½] - 10 N



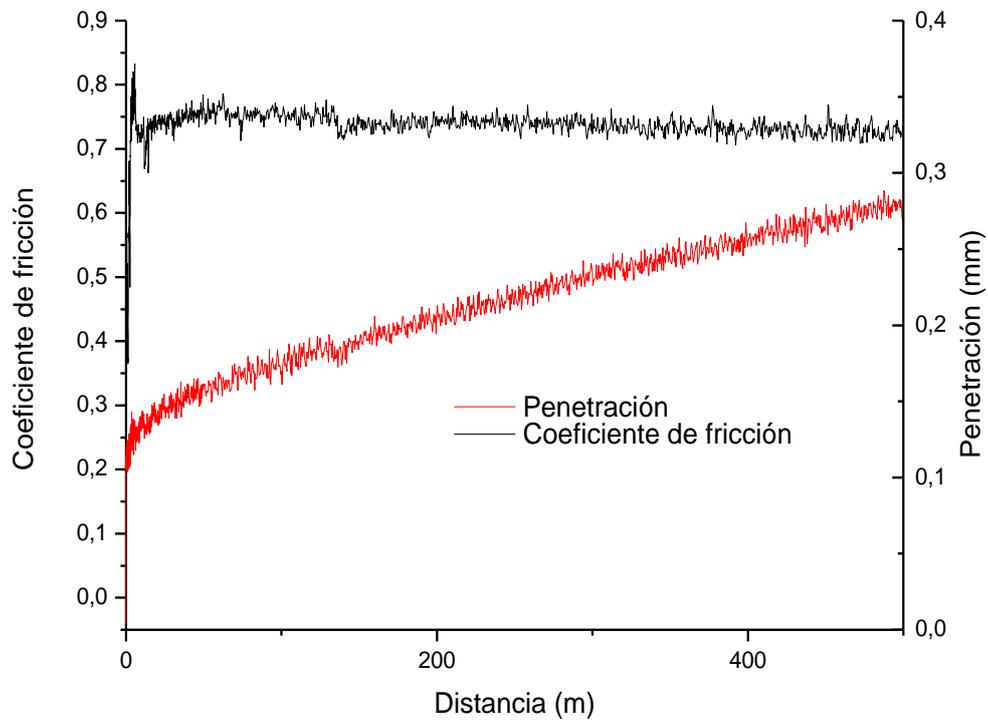
Bicapa 316L [½-½] (750 MPa): Capa Mezcla 316L [½] - 10 N



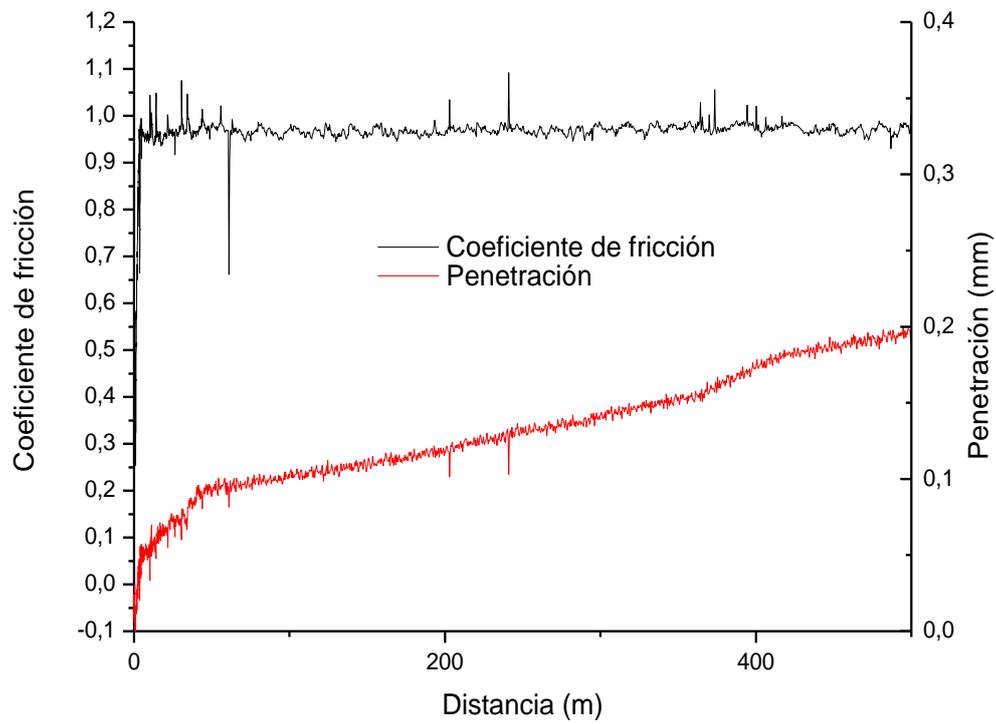
Bicapa 316L [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa): Capa 316L [$\frac{2}{3}$] - 10 N



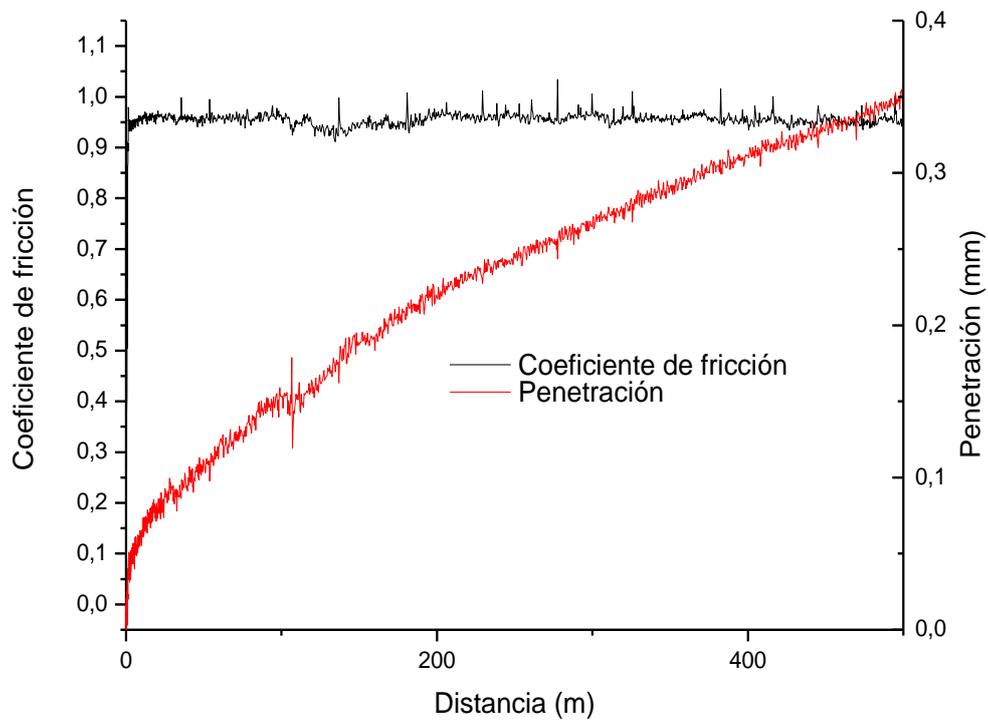
Bicapa 316L [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa): Capa Mezcla 316L [$\frac{1}{3}$] - 10 N



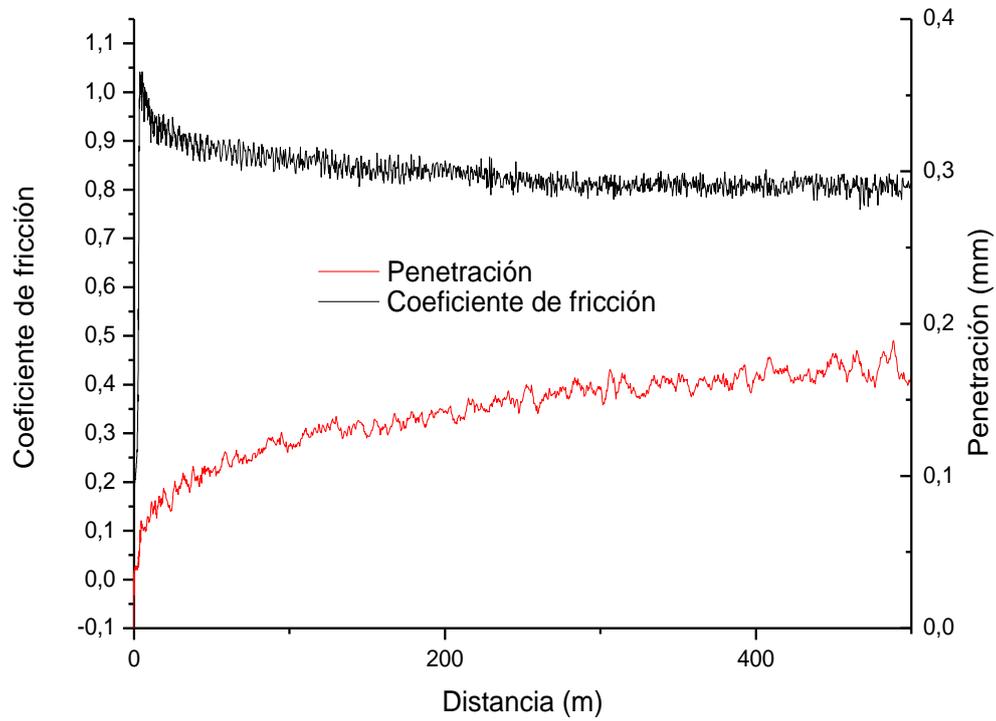
Bicapa 430L [½-½] (750 MPa): Capa 430L [½] - 10 N



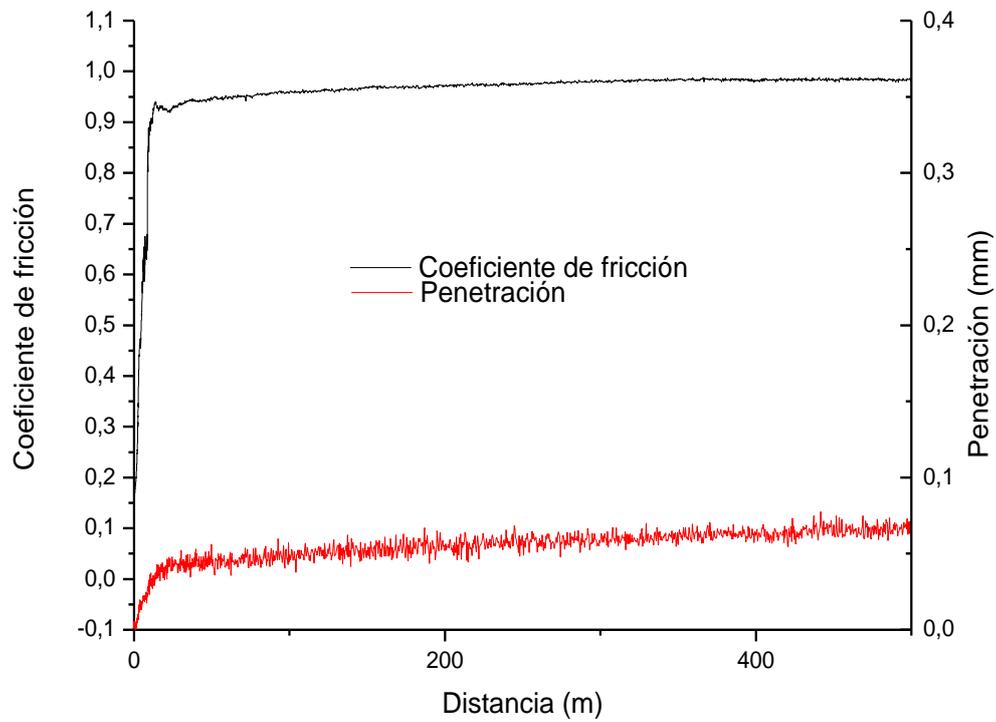
Bicapa 430L [½-½] (750 MPa): Capa Mezcla 430L [½] - 10 N



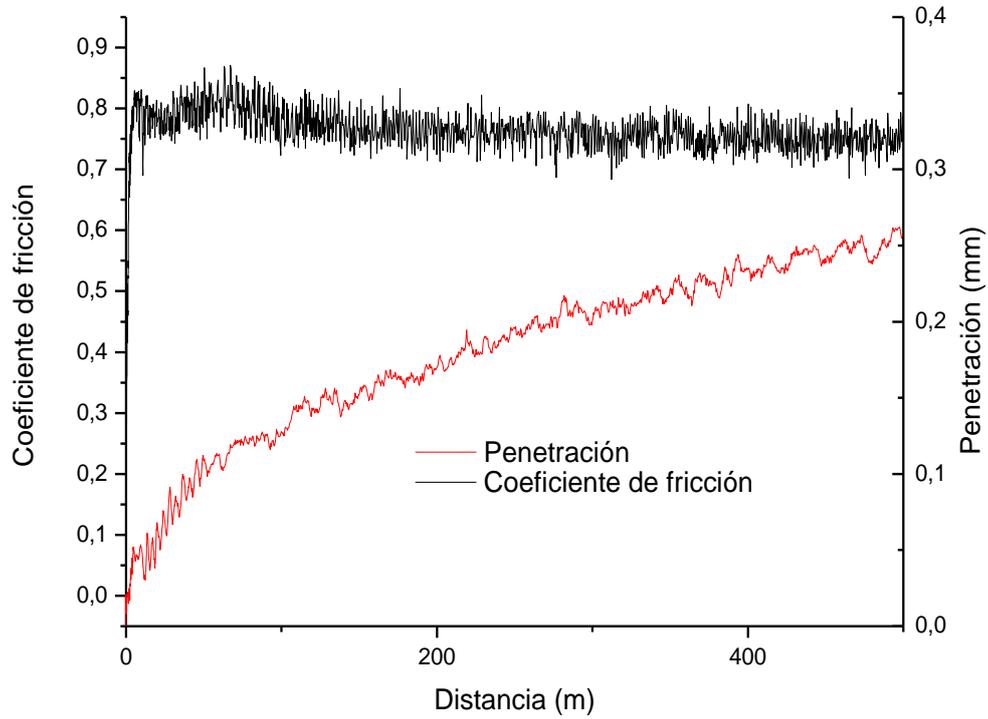
Bicapa 430L [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa): Capa 430L [$\frac{2}{3}$] - 10 N



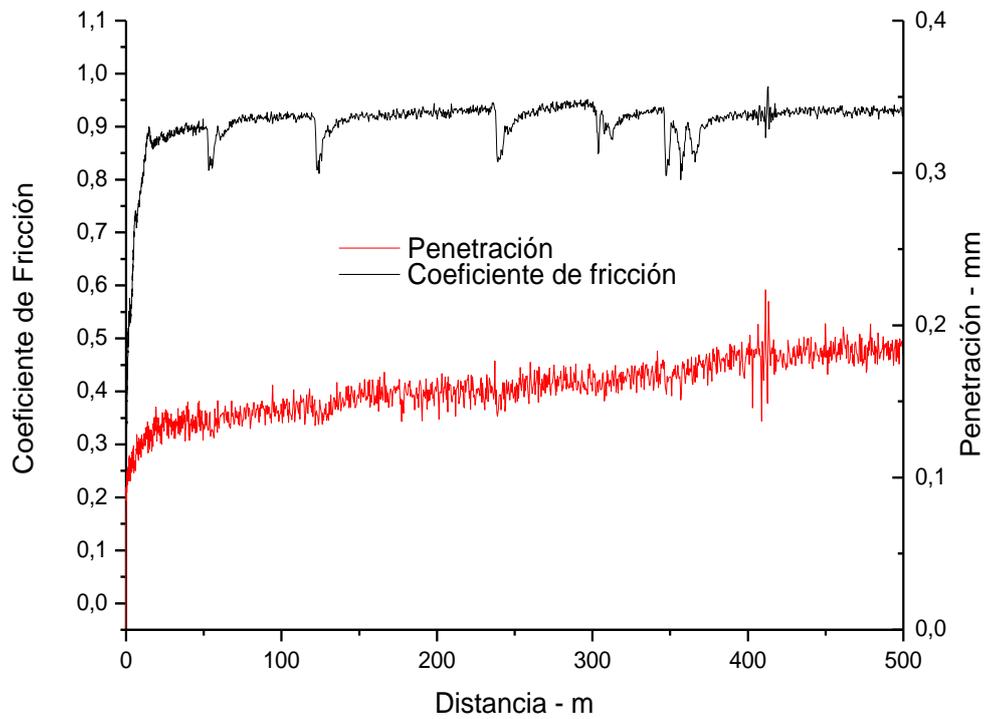
Bicapa 430L [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa): Capa Mezcla 430L [$\frac{1}{3}$] - 10 N



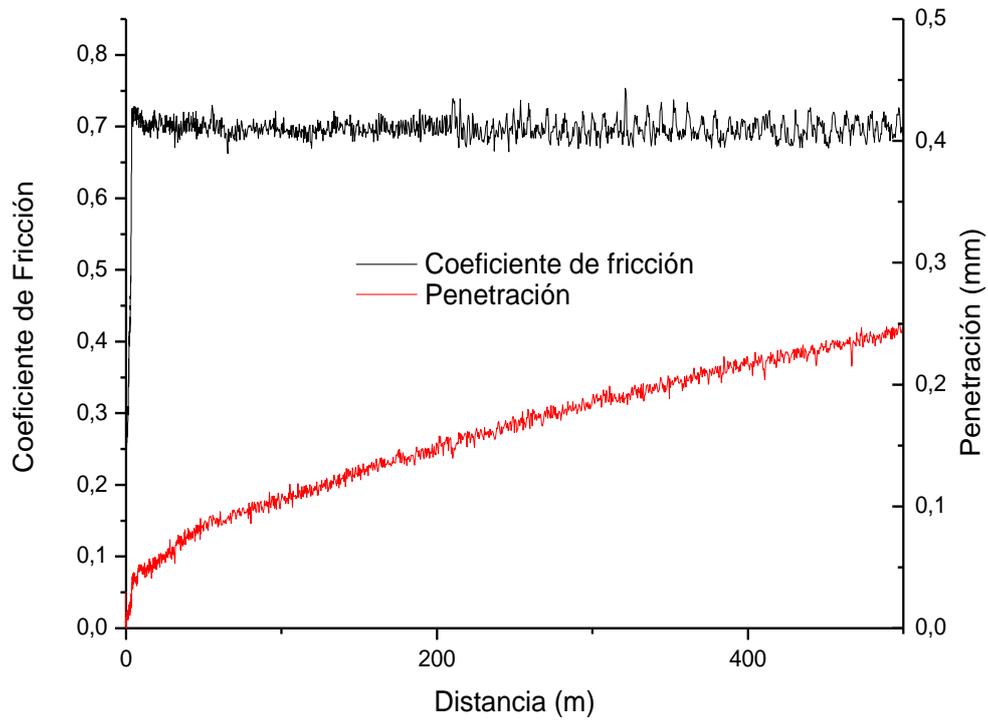
Bicapa 50/50 [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa): Capa 50/50 [$\frac{2}{3}$] - 10 N



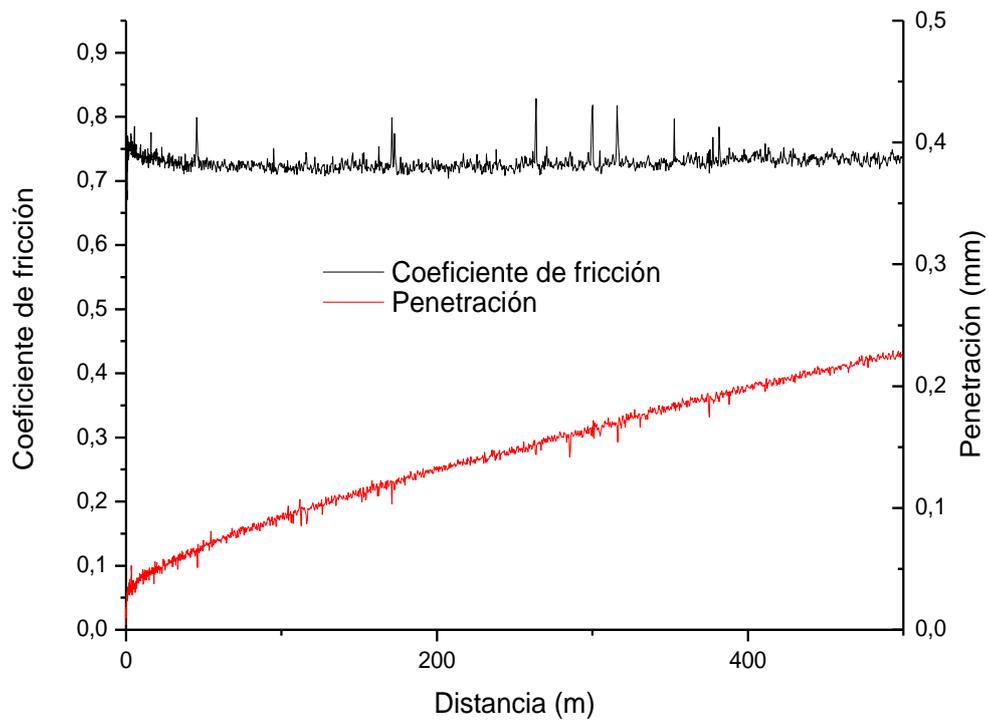
Bicapa 50/50 [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa): Capa Mezcla 50/50 [$\frac{1}{2}$] - 10 N



Bicapa Austenítica [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (550 MPa): Capa 316L [300-500 μm] [$\frac{1}{2}$] - 10 N



Bicapa Austenítica [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (550 MPa): Capa 316L [500-710 μm] [$\frac{1}{2}$] - 10 N





Anexo 4

Comportamiento tribológico: Ensayo de desgaste con lubricación discontinua



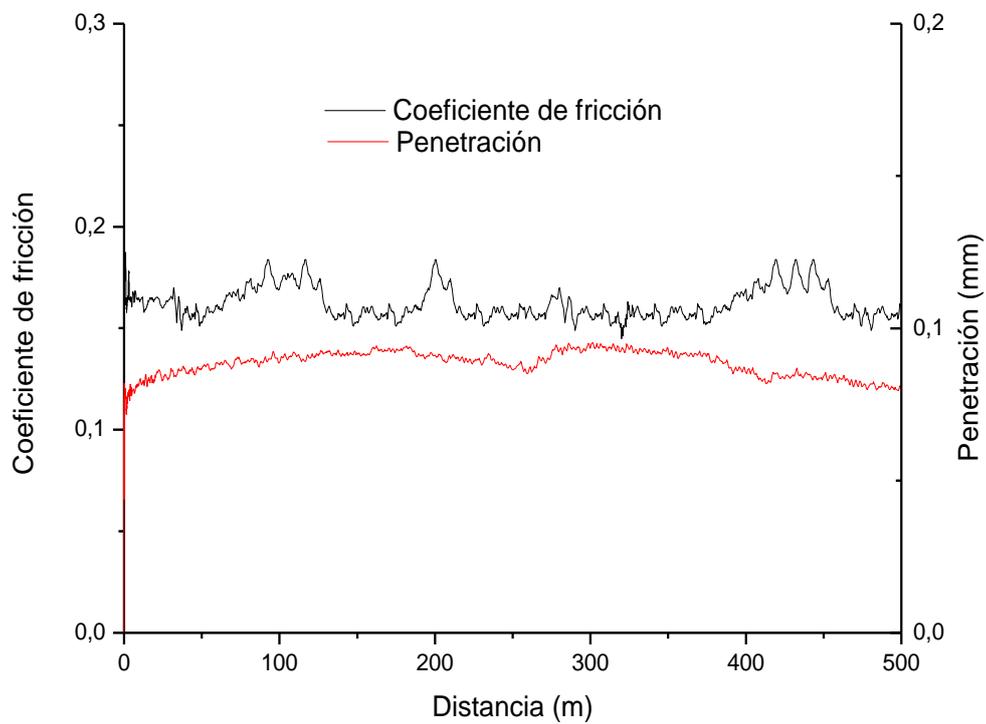
Universidad de Valladolid



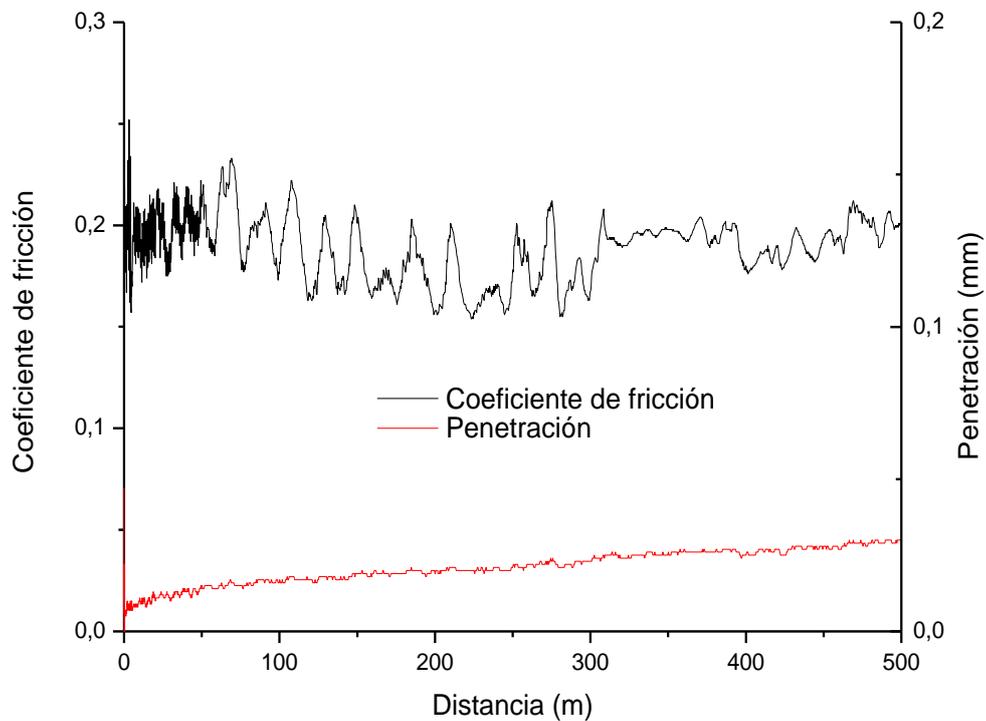
ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

PROYECTO FIN DE CARRERA

316L (550 MPa) - 10 N

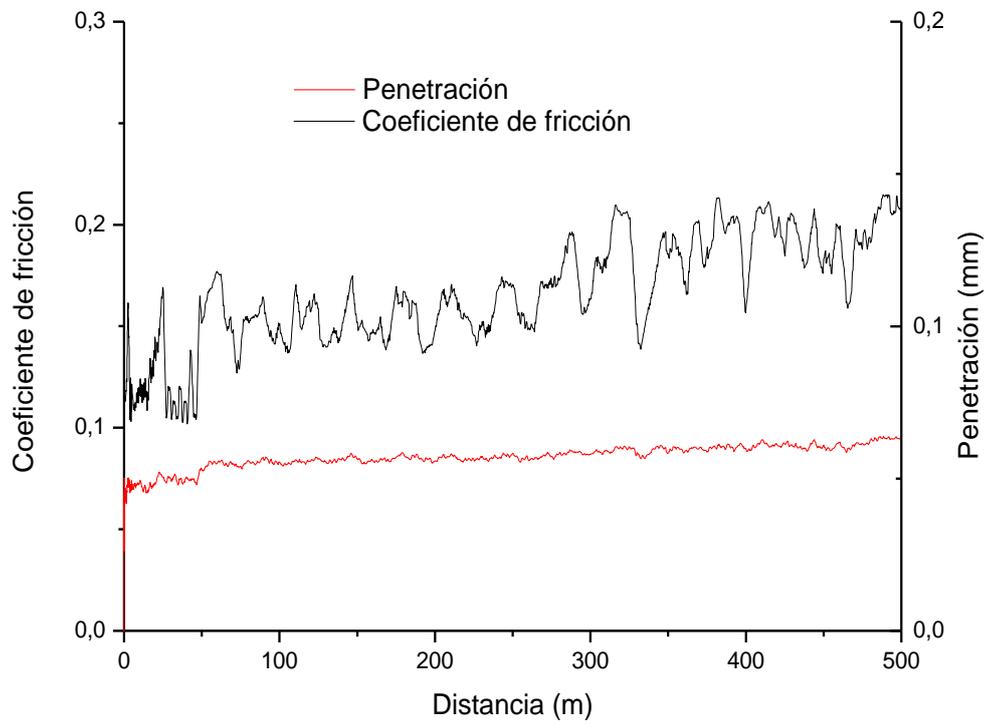


316L (750 MPa) - 10 N

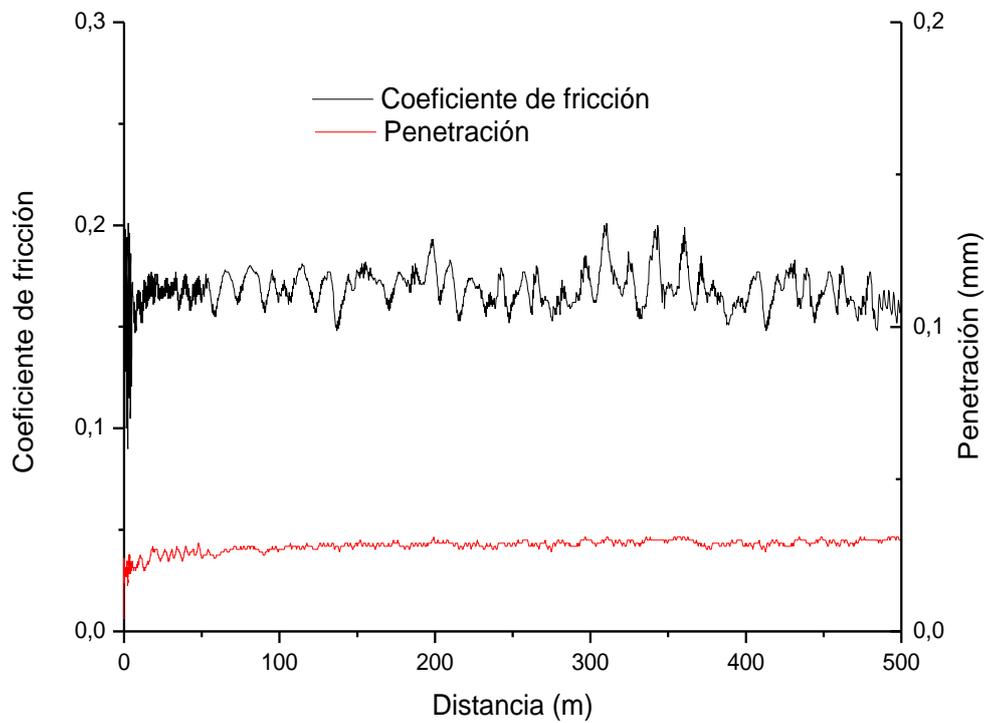




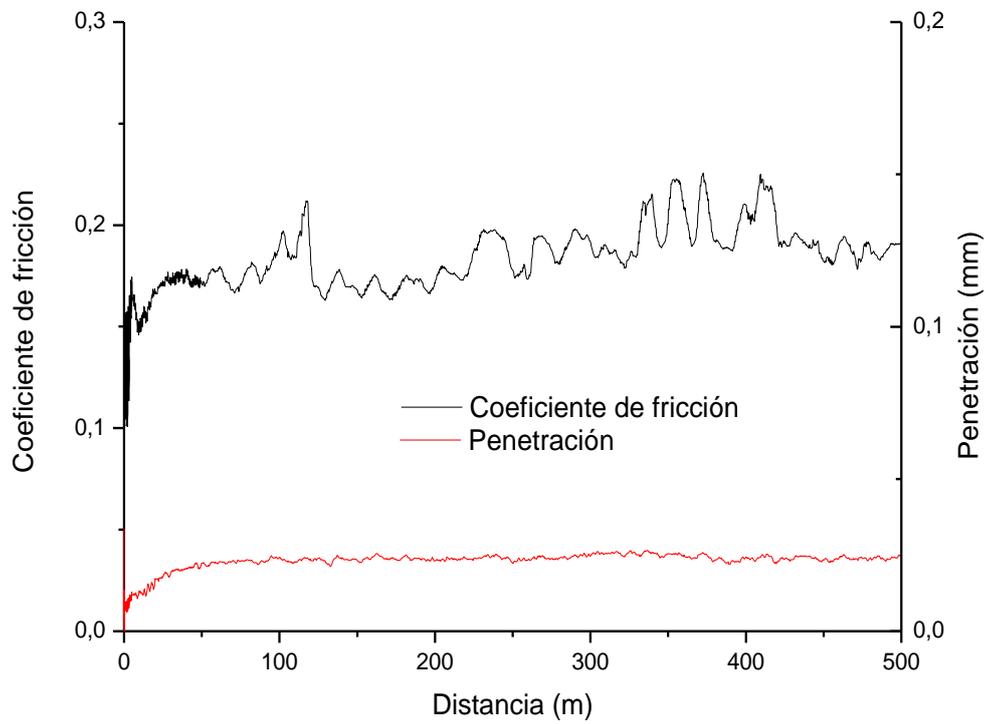
430L (550 MPa) - 10 N



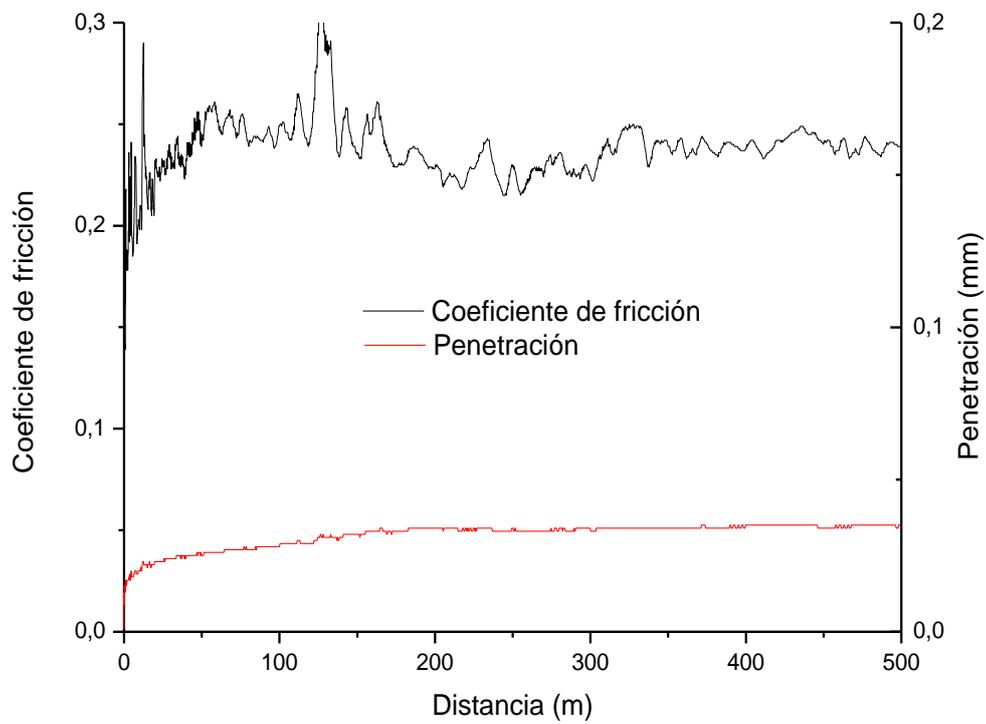
430L (750 MPa) - 10 N



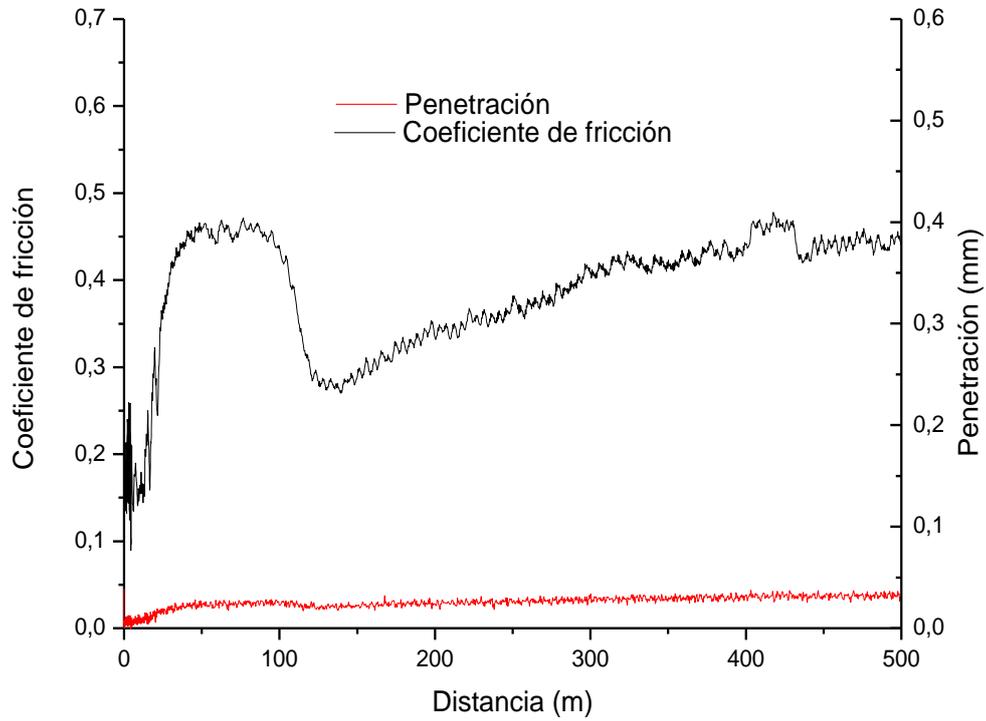
Dúplex 50/50 (550 MPa) - 10 N



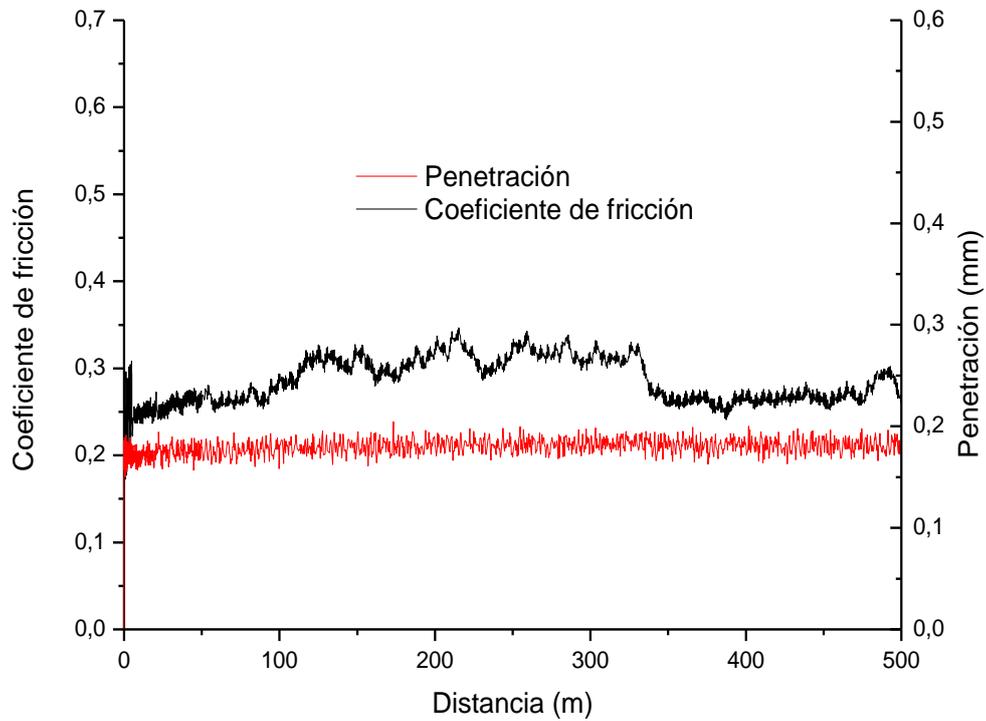
Dúplex 50/50 (750 MPa) - 10 N



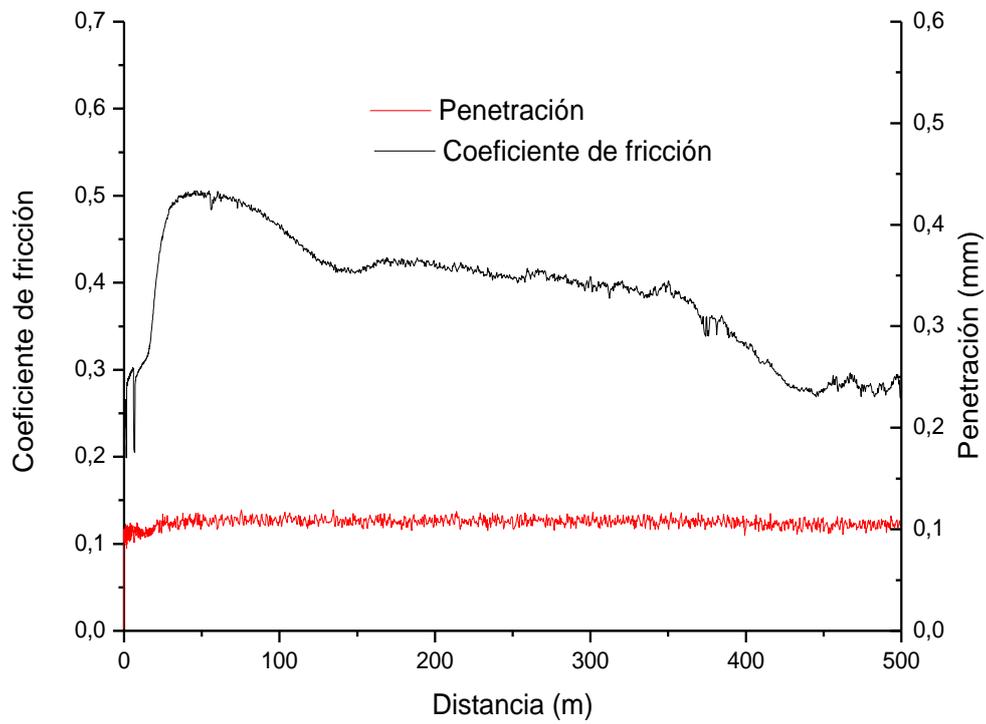
Bicapa 316L [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa): Capa Mezcla 316L [$\frac{1}{3}$] - 10 N



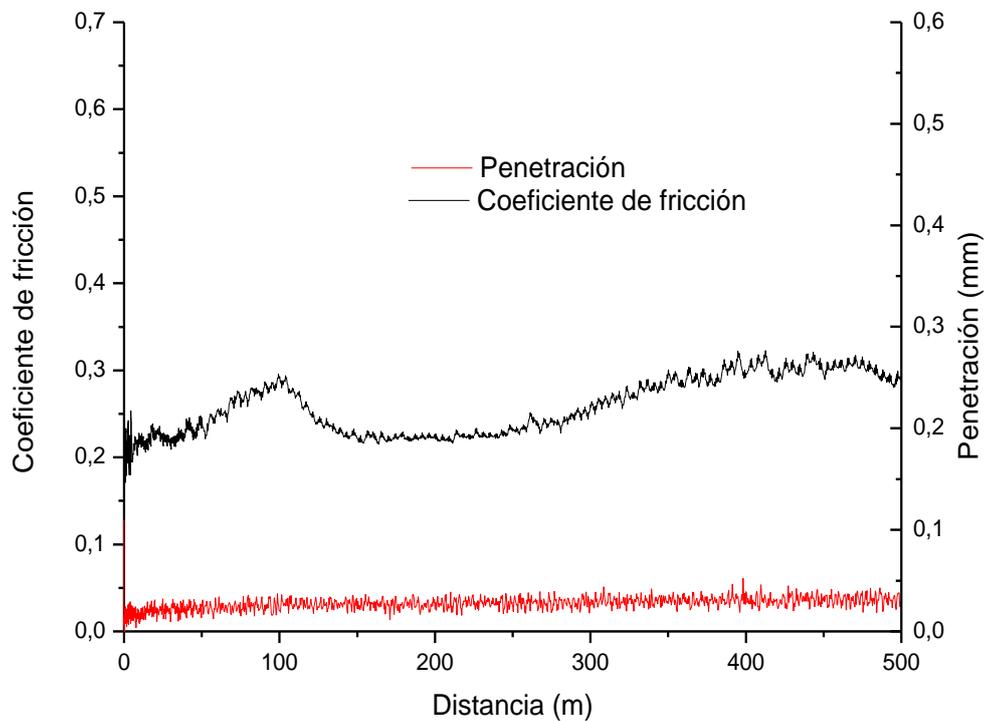
Bicapa 316L [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (750 MPa): Capa Mezcla 316L [$\frac{1}{2}$] - 10 N



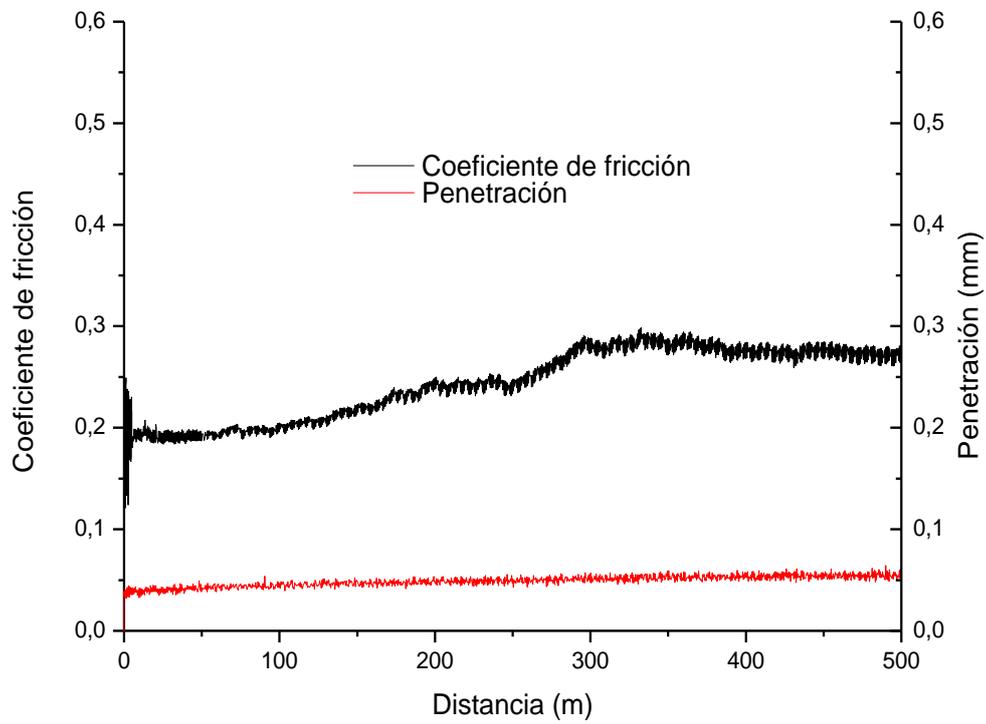
Bicapa 316L [$\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{2}$] (550 MPa): Capa Mezcla 316L [$\frac{1}{2}$] - 10 N



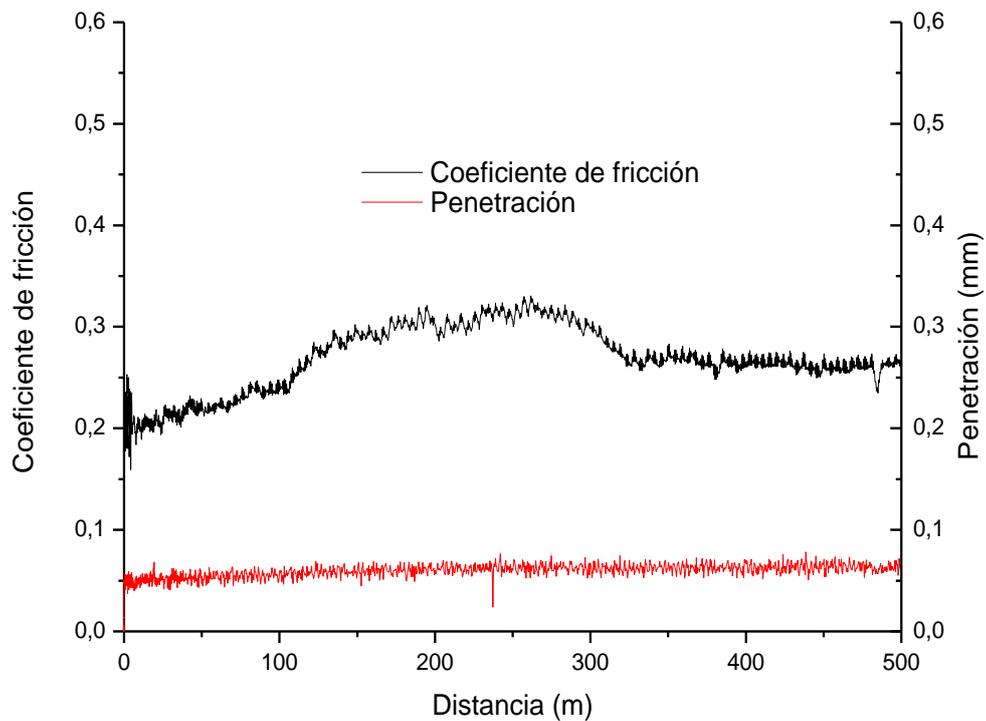
Bicapa 430L [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa): Capa Mezcla 430L [$\frac{1}{3}$] - 10 N



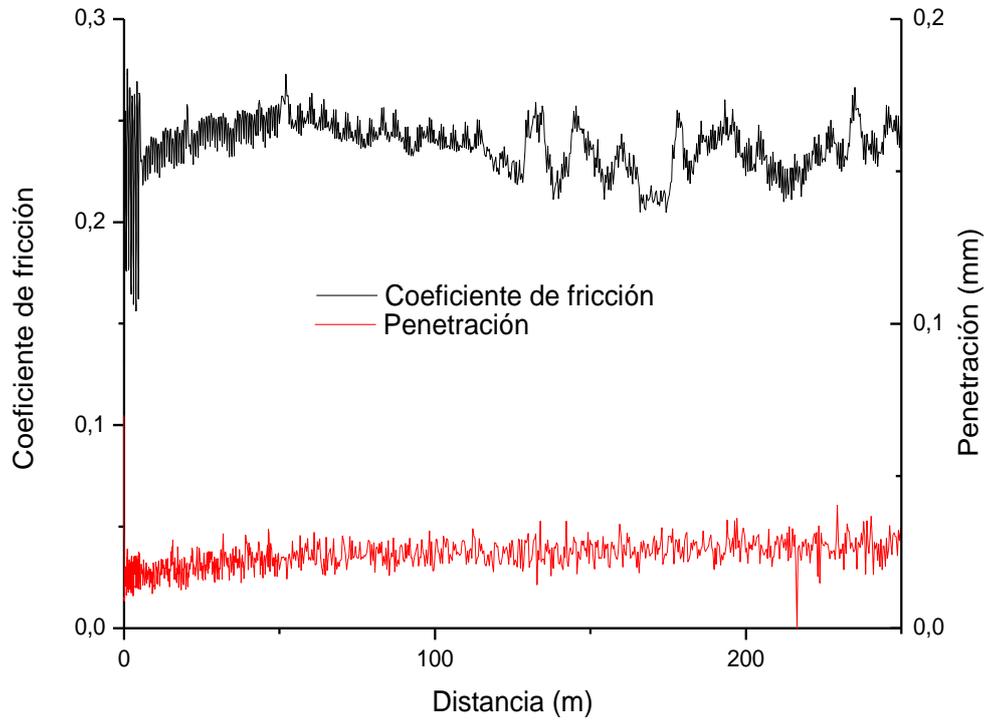
Bicapa 430L [½-½] (750 MPa): Capa Mezcla 430L [½] - 10 N



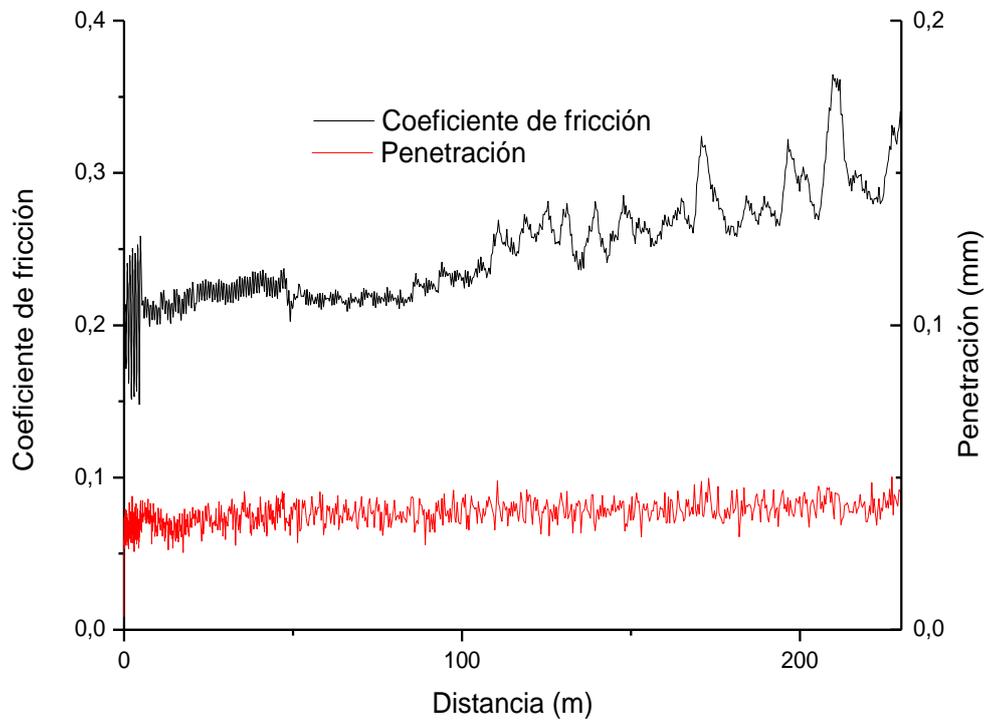
Bicapa 50/50 [⅔-⅓] (750 MPa): Capa Mezcla 50/50 [½] - 10 N



Bicapa Austenítica [½-½] (550 MPa): Capa 316L [500-710 μm] [½] - 10 N



Bicapa Austenítica [½-½] (550 MPa): Capa 316L [300-500 μm] [½] - 10 N





Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

PROYECTO FIN DE CARRERA



Anexo 5

Comportamiento tribológico: Ensayo de desgaste con lubricación interna



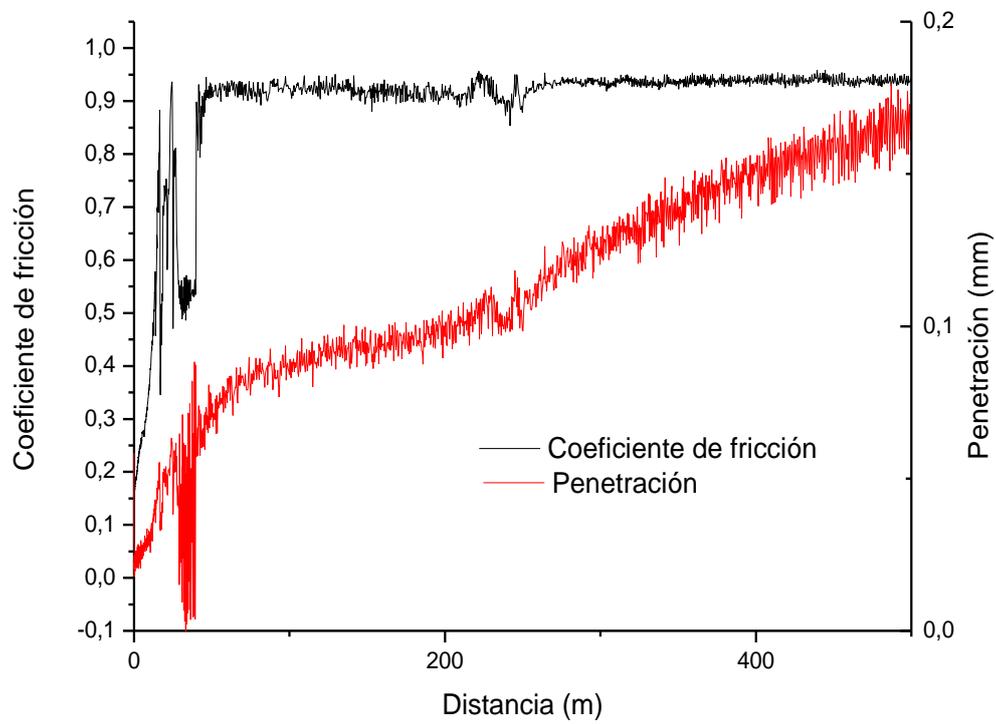
Universidad de Valladolid



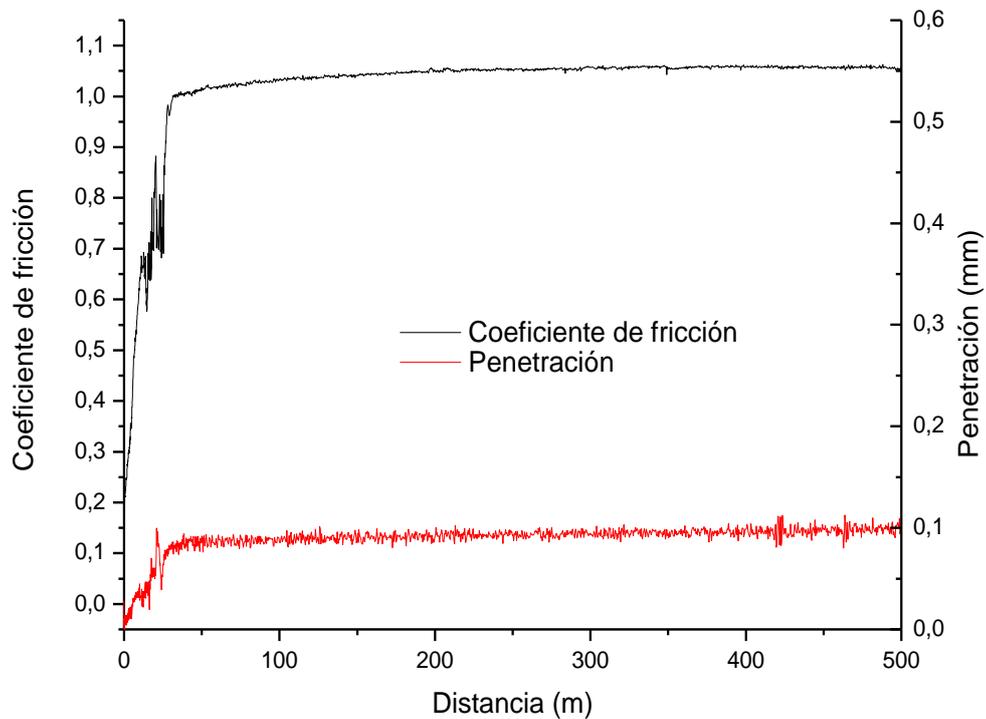
ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

PROYECTO FIN DE CARRERA

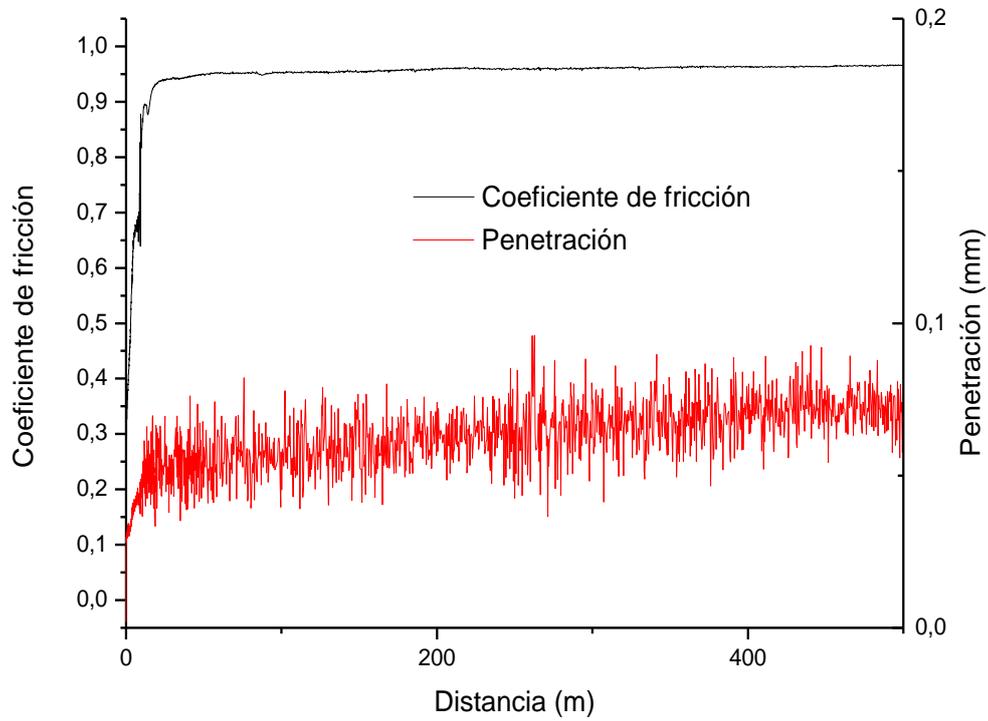
430L (550 MPa) - 10 N (Carboximetil 2% - 0.5 horas en EPOVAC)



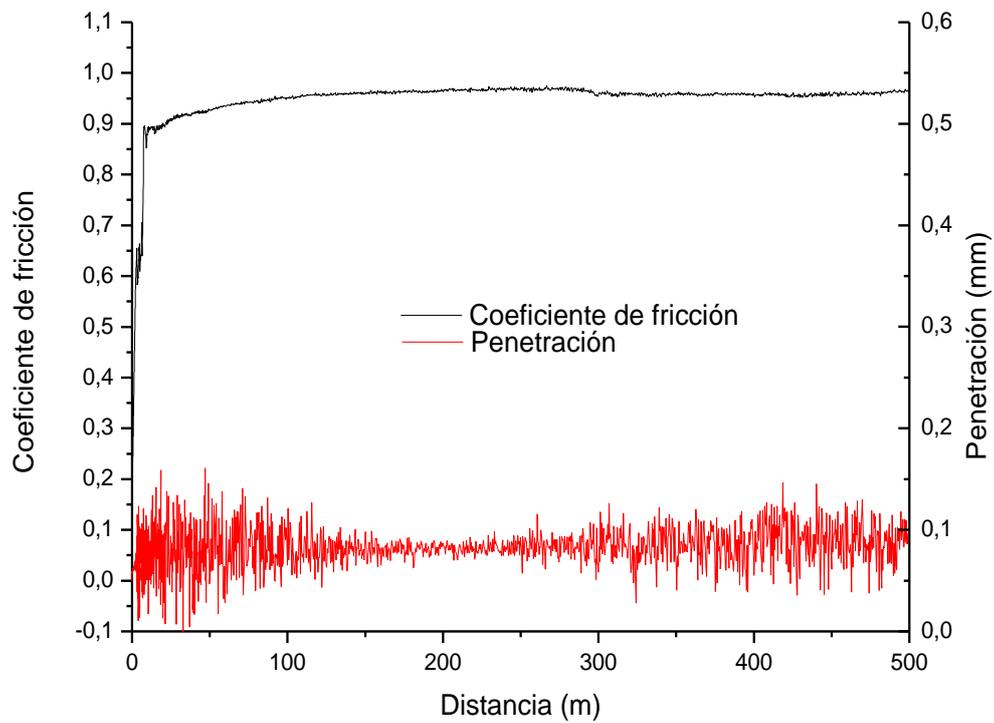
430L (550 MPa) - 5 N (Carboximetil 2% - 0.5 horas en EPOVAC)



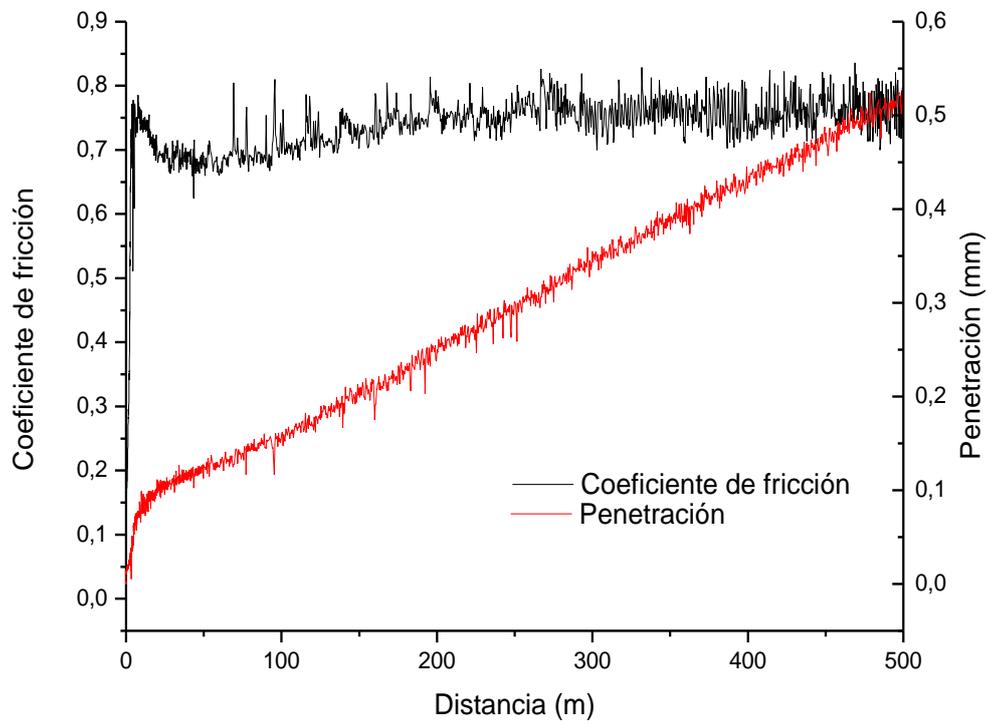
430L (750 MPa) - 10 N (Carboximetil 2% - 0.5 horas en EPOVAC)



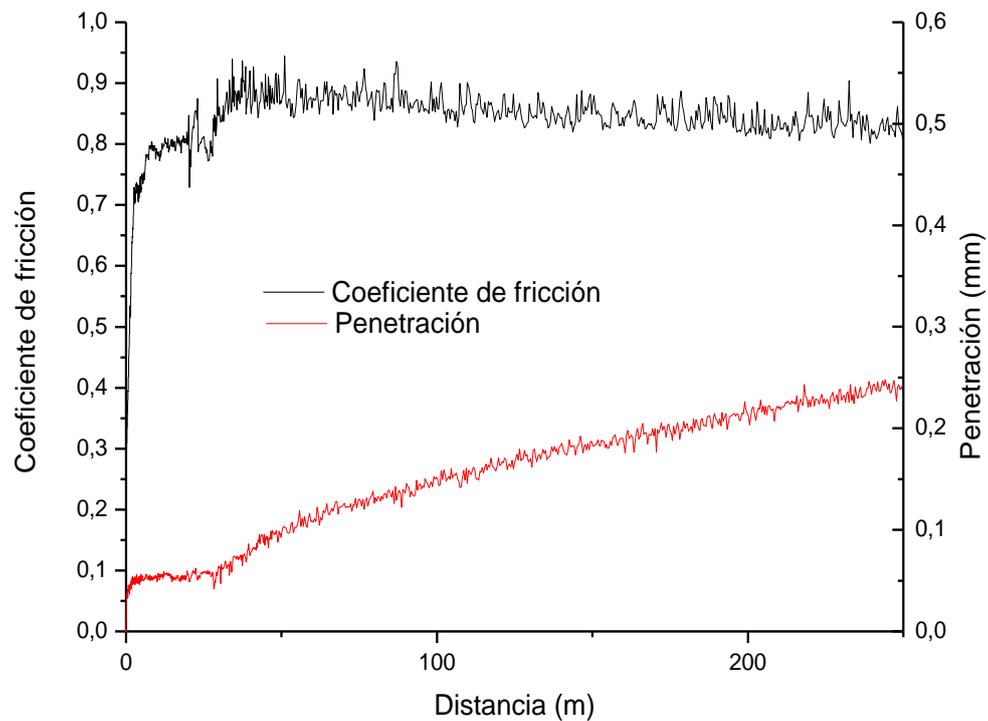
430L (750 MPa) - 5 N (Carboximetil 2% - 0.5 horas en EPOVAC)



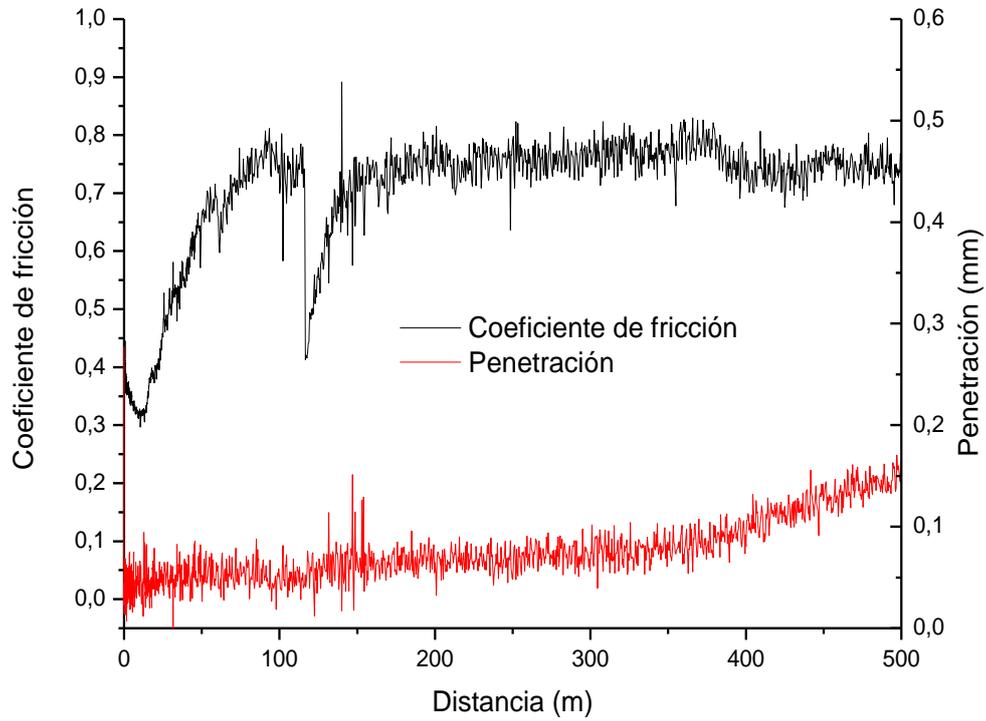
316L (550 MPa) - 10 N (Carboximetil 2% - 0.5 horas en EPOVAC)



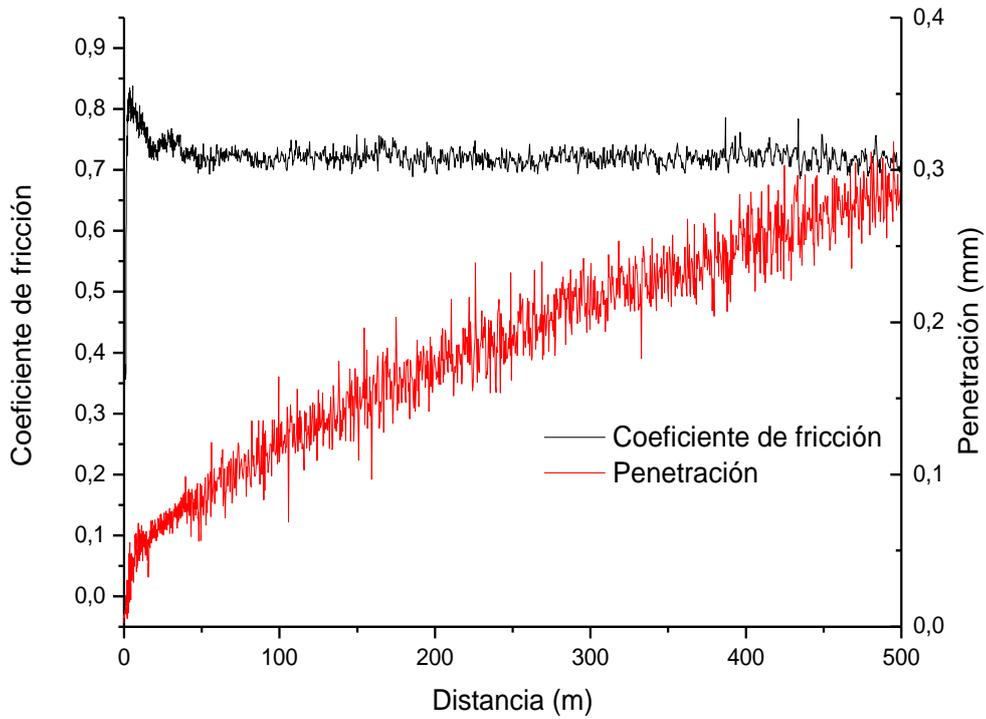
316L (550 MPa) - 10 N (Carboximetil 0.5% - 12 horas en EPOVAC)



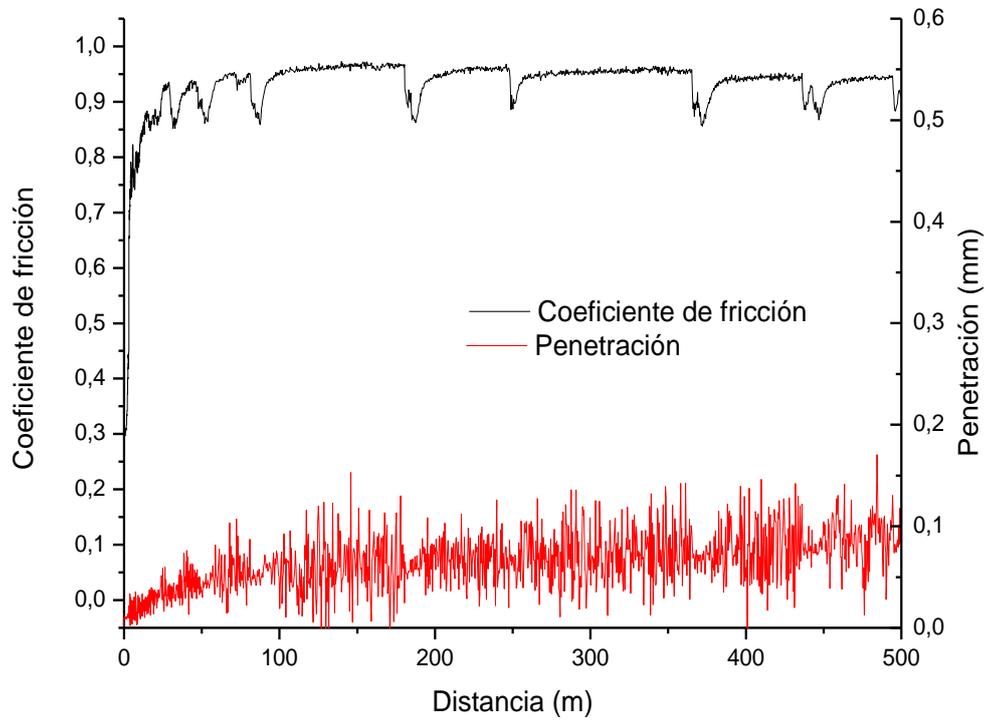
316L (550 MPa) - 5 N (Carboximetil 2% - 0.5 horas en EPOVAC)



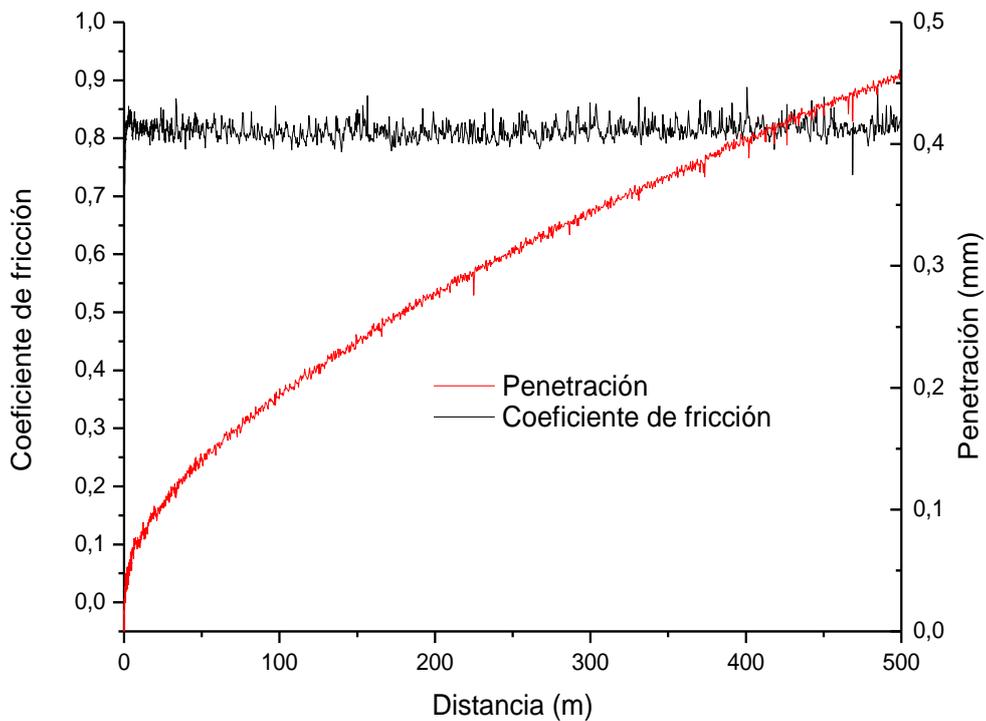
316L (750 MPa) - 10 N (Carboximetil 2% - 0.5 horas en EPOVAC)



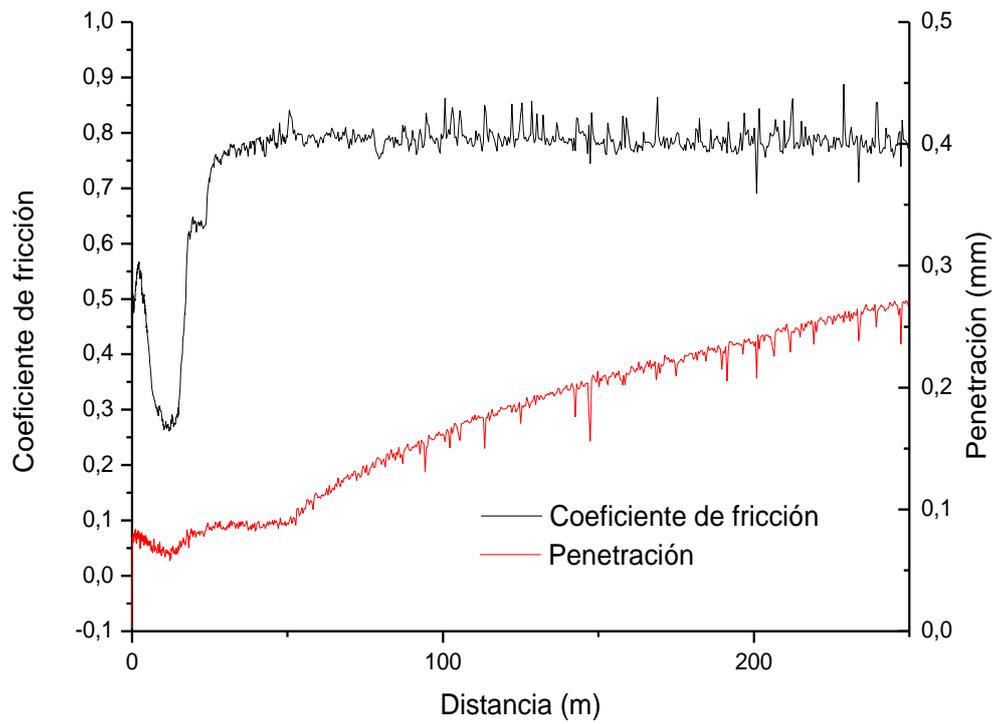
316L (750 MPa) -5 N (Carboximetil 2% - 0.5 horas en EPOVAC)



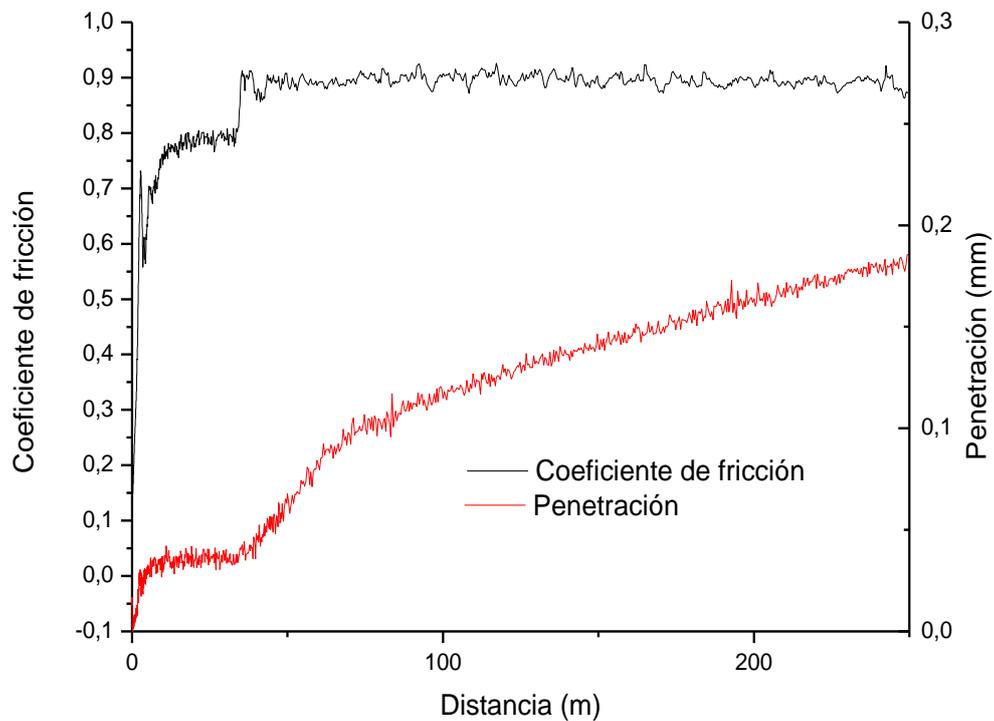
316L [300-500 μ m] (550 MPa) - 10 N (Carboximetil 2% - 0.5 horas en EPOVAC)



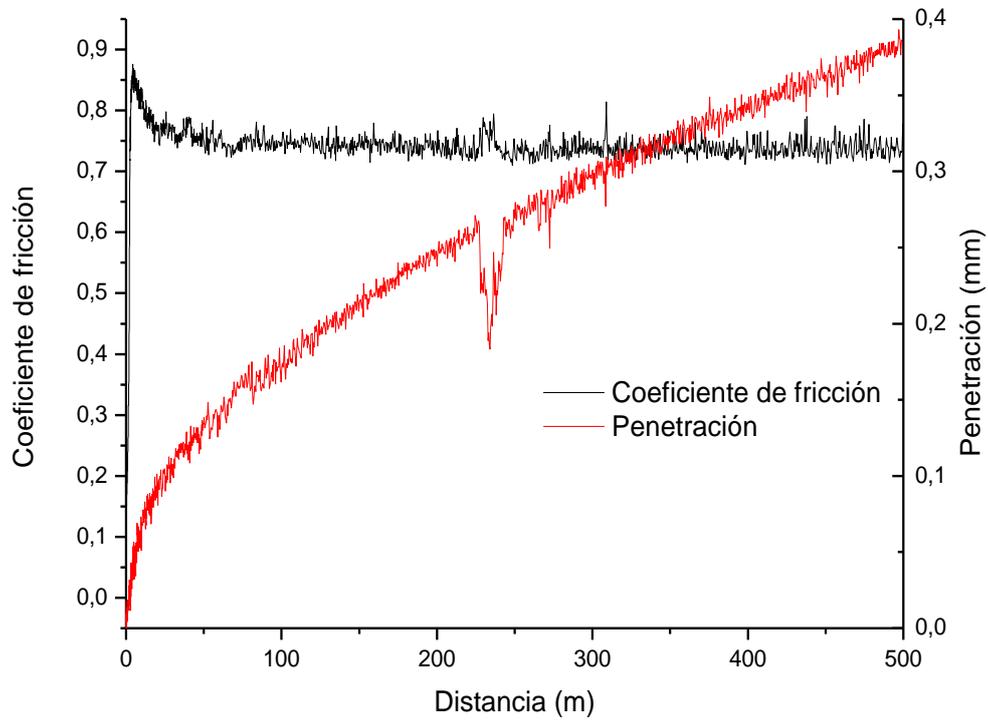
316L [300-500 μm] (550 MPa) - 10 N (Carboximetil 0.5% - 0.5 horas en EPOVAC)



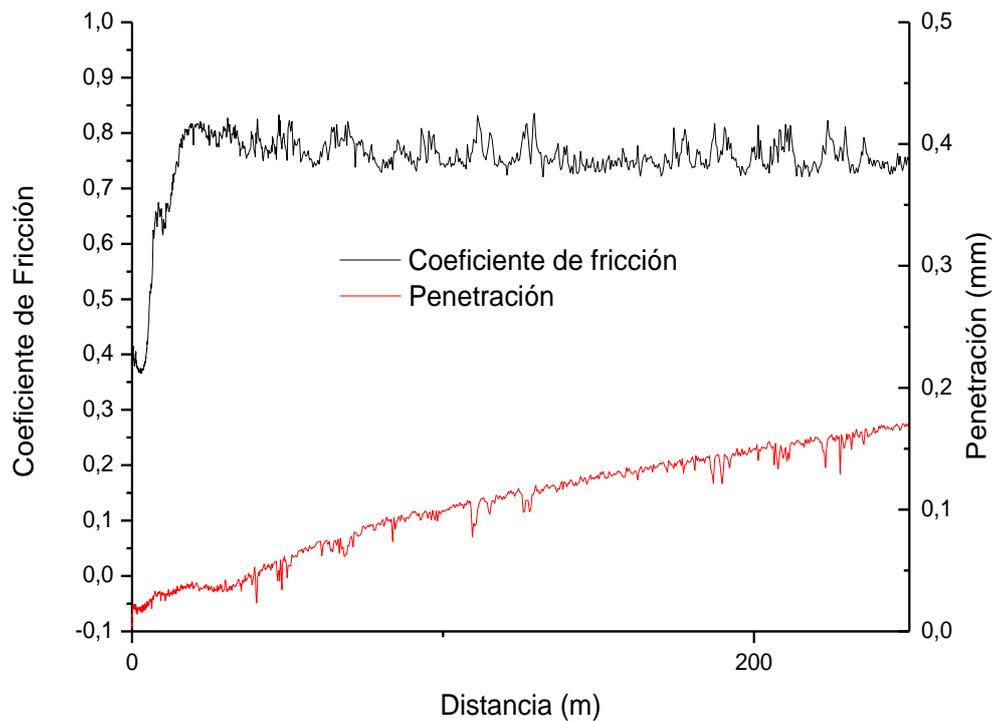
316L [300-500 μm] (550 MPa) - 10 N (Carboximetil 0.5% - 12 horas en EPOVAC)



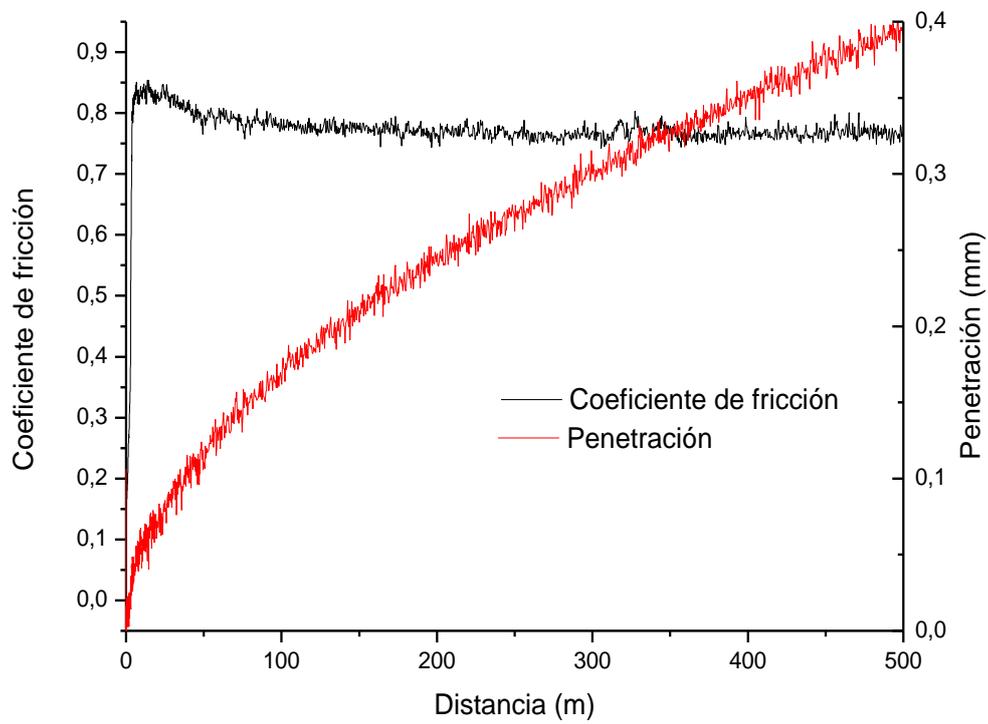
316L [300-500 μm] (750 MPa) - 10 N (Carboximetil 2% - 0.5 horas en EPOVAC)



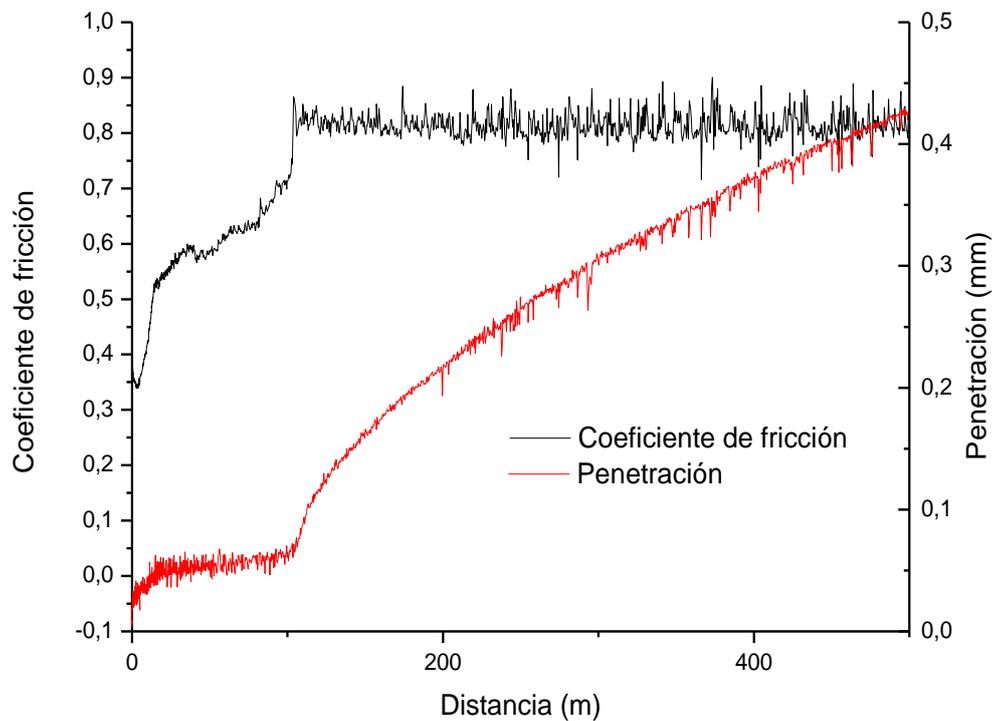
316L [300-500 μm] (750 MPa) - 10 N (Carboximetil 0.5% - 0.5 horas en EPOVAC)



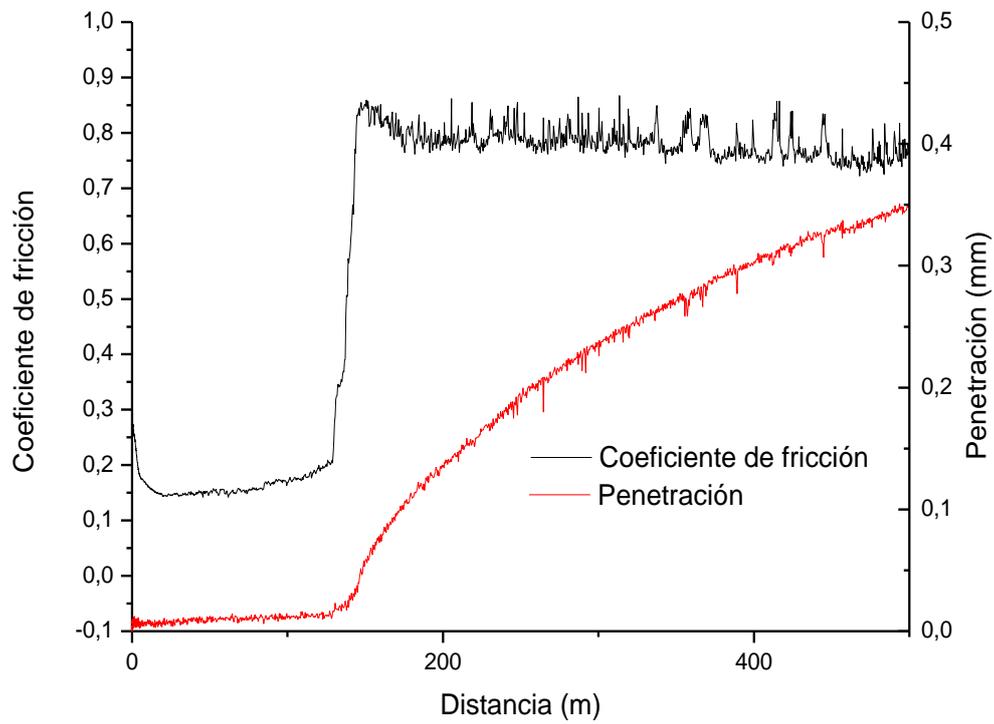
316L [500-710 μm] (550 MPa) - 10 N (Carboximetil 2% - 0.5 horas en EPOVAC)



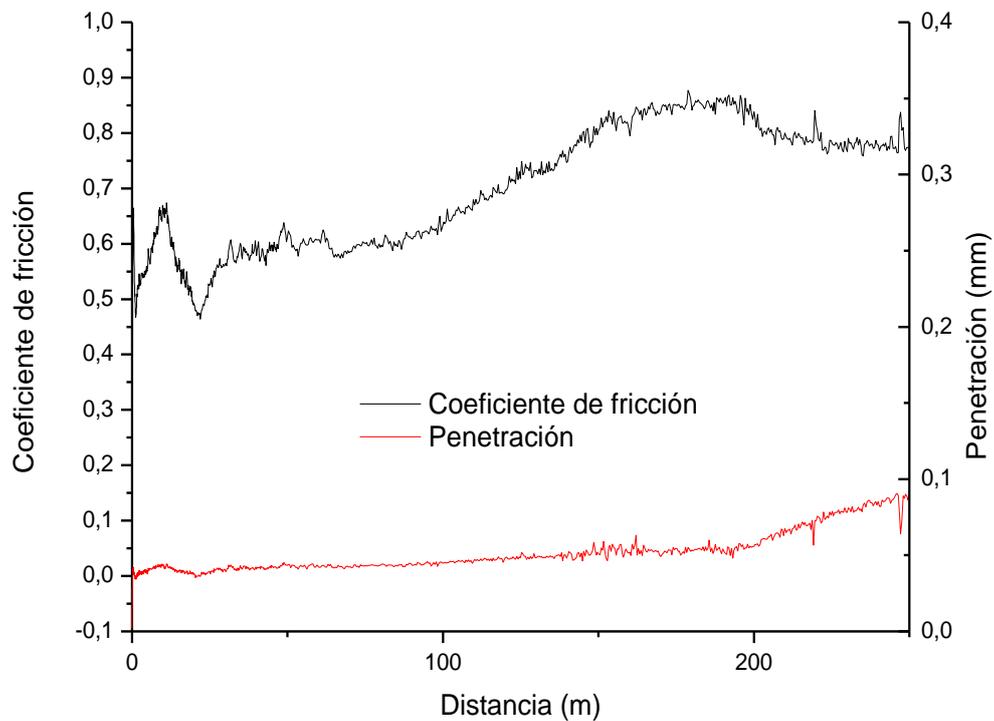
316L [500-710 μm] (550 MPa) - 10 N (Carboximetil 1% - 0.5 horas en EPOVAC)



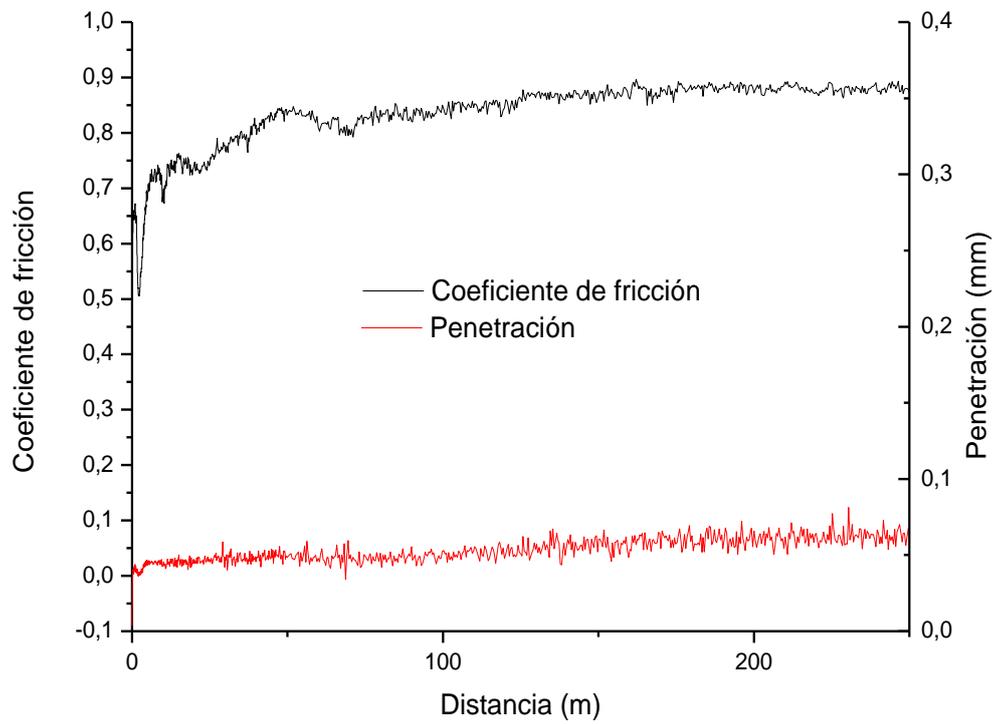
316L [500-710 μm] (550 MPa) - 10 N (Carboximetil 0.5% - 0.5 horas en EPOVAC)



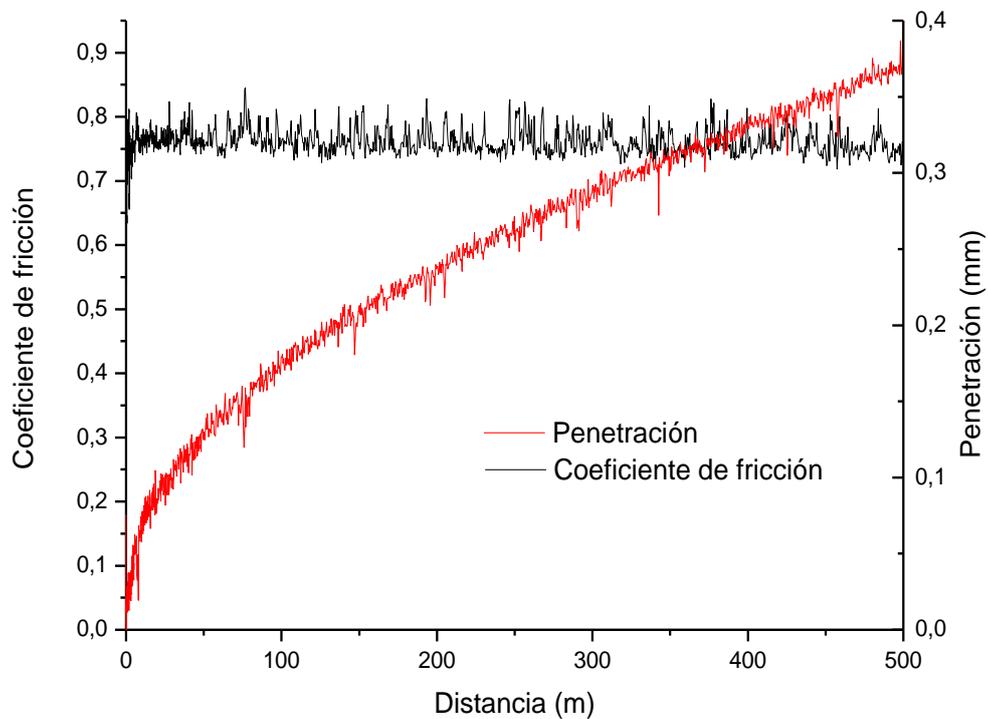
316L [500-710 μm] (550 MPa) - 10 N (Carboximetil 0.5% - 3 horas en EPOVAC)



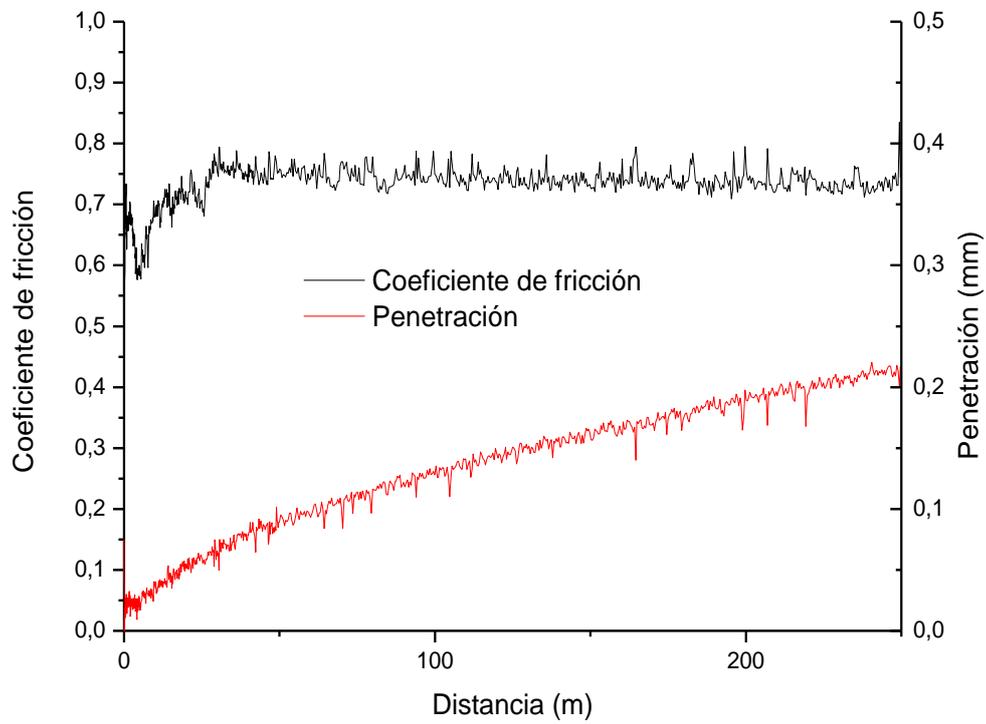
316L [500-710 μm] (550 MPa) - 10 N (Carboximetil 0.5% - 12 horas en EPOVAC)



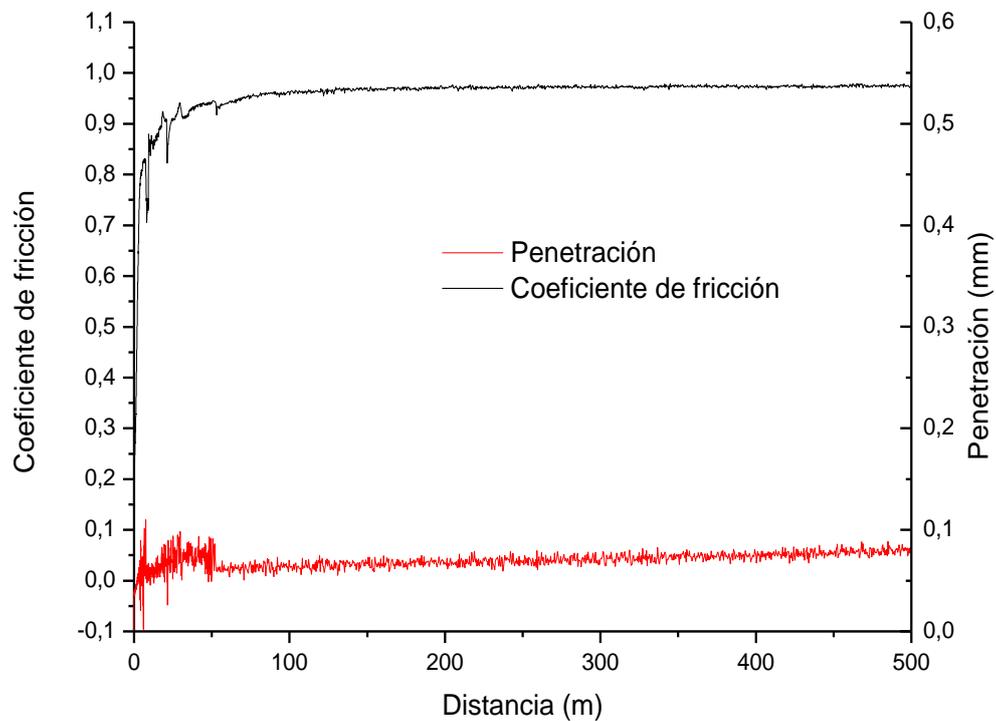
316L [500-710 μm] (750 MPa) - 10 N (Carboximetil 2% - 0.5 horas en EPOVAC)



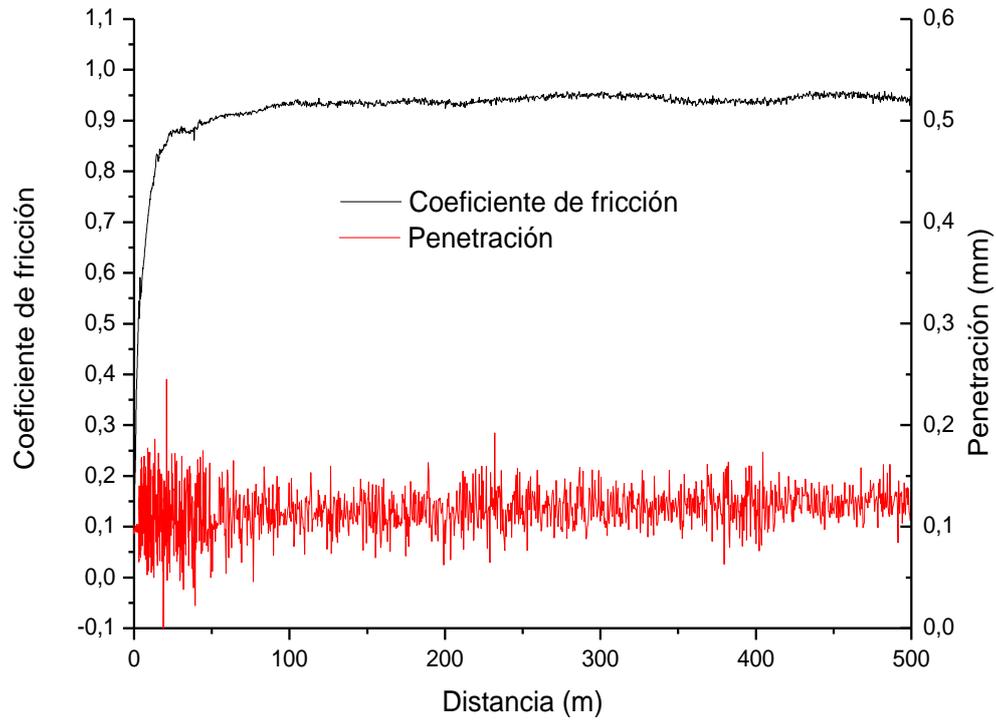
316L [500-710 μm] (750 MPa) - 10 N (Carboximetil 0.5% - 0.5 horas en EPOVAC)



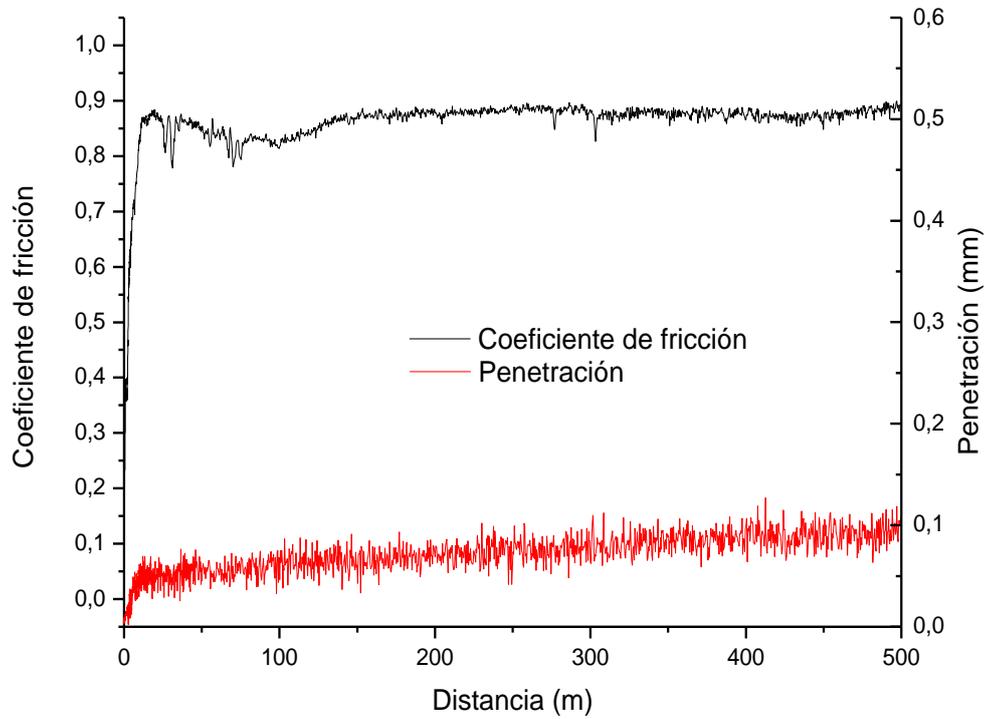
Dúplex 50/50 (750 MPa) - 10 N (Carboximetil 2% - 0.5 horas en EPOVAC)



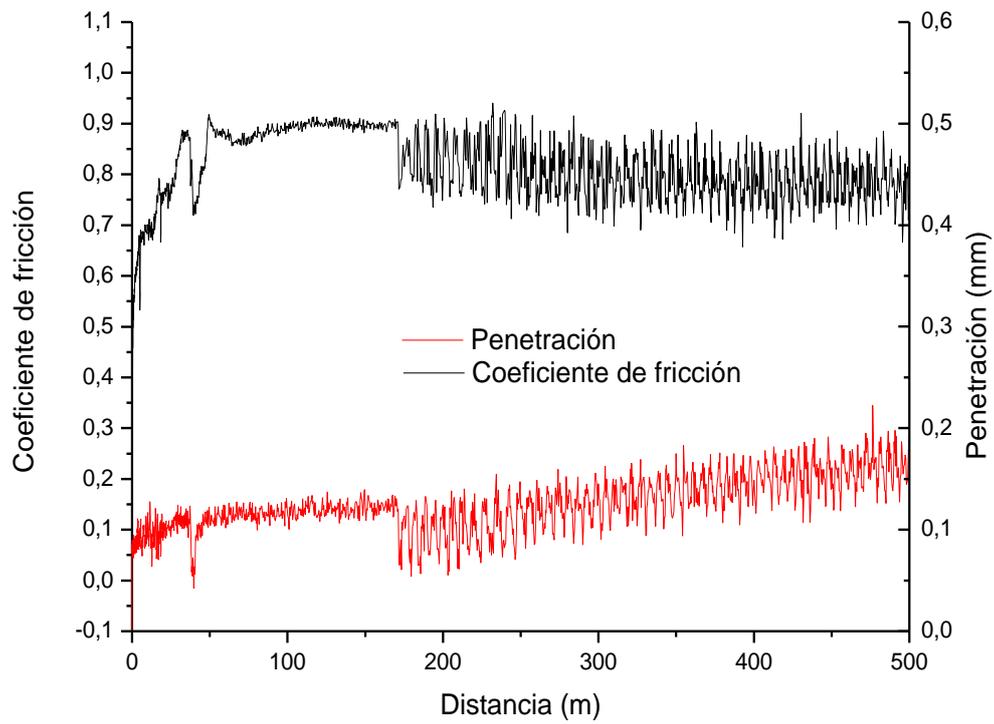
Dúplex 50/50 (750 MPa) - 5 N (Carboximetil 2% - 0.5 horas en EPOVAC)



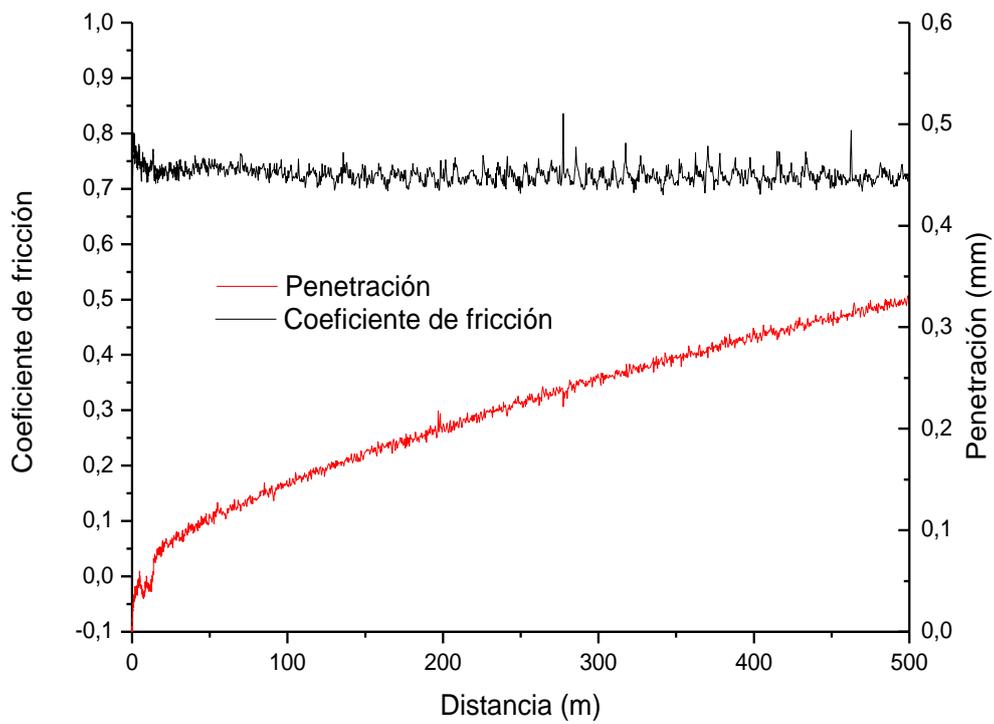
Dúplex 50/50 (550 MPa) - 10 N (Carboximetil 2% - 0.5 horas en EPOVAC)



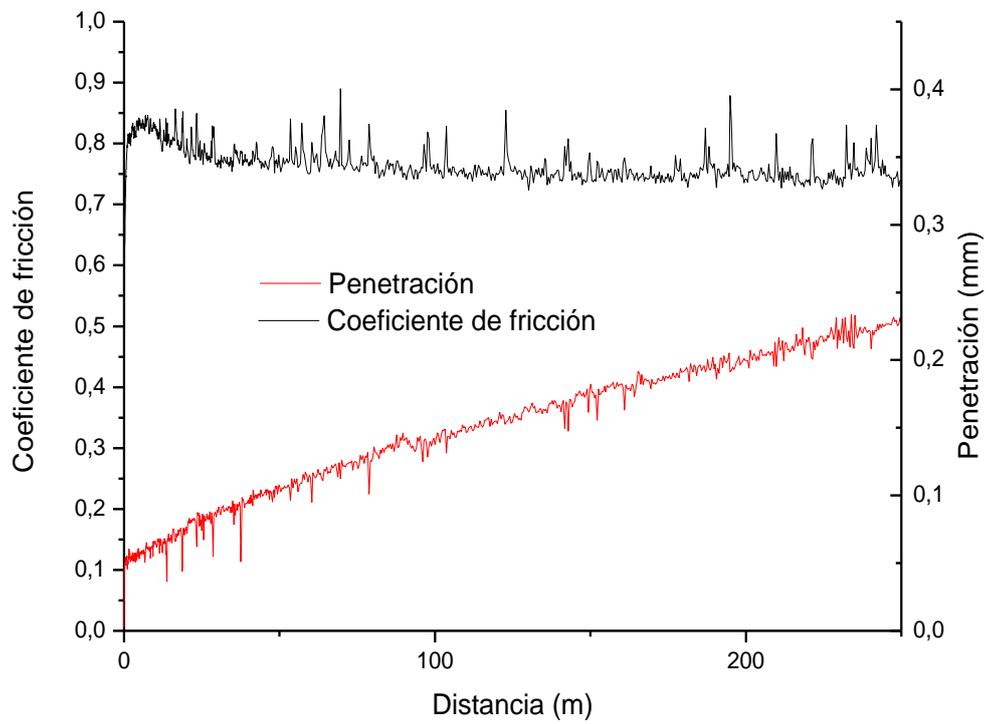
Dúplex 50/50 (550 MPa) - 5 N (Carboximetil 2% - 0.5 horas en EPOVAC)



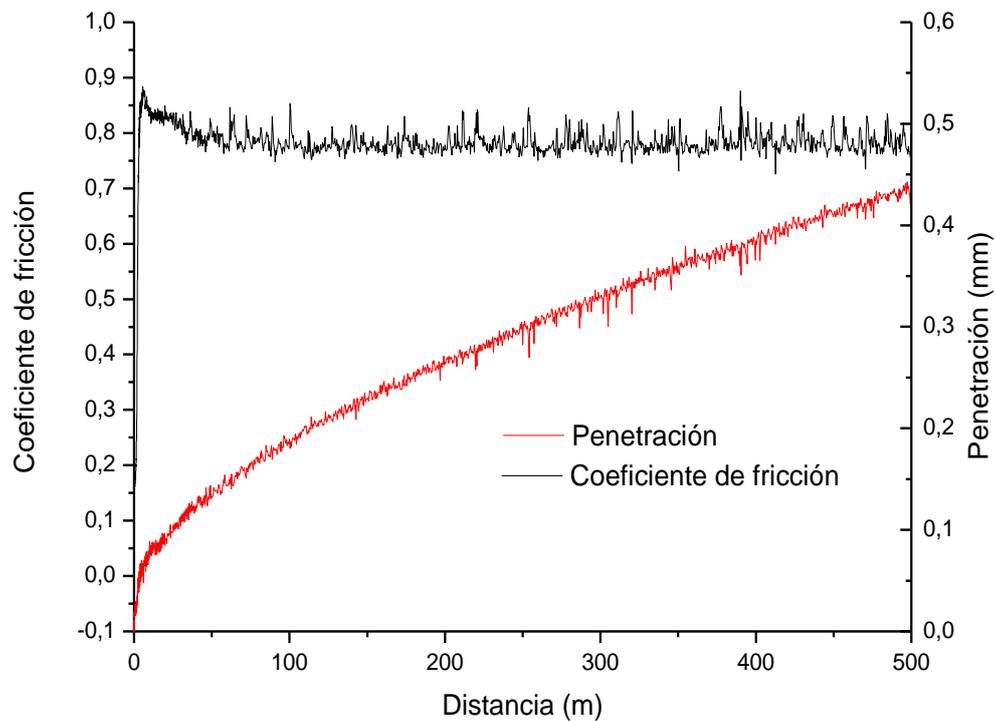
Mezcla Austenítica (750 MPa) - 10 N (Carboximetil 2% - 0.5 horas en EPOVAC)



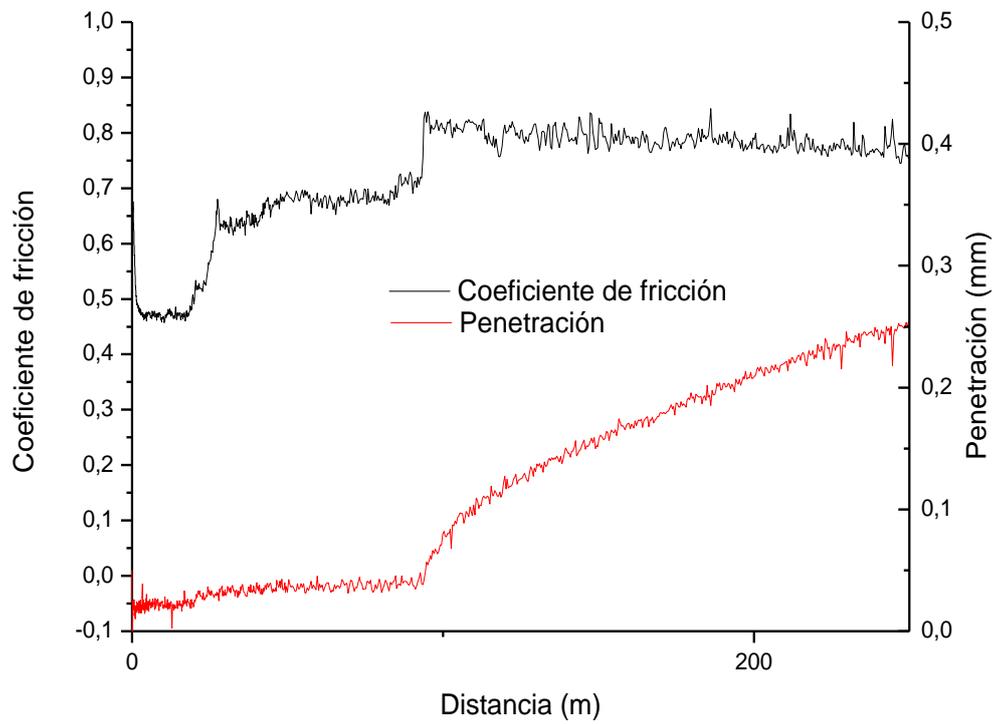
Mezcla Austenítica (750 MPa) - 10 N (Carboximetil 0.5% - 0.5 horas en EPOVAC)



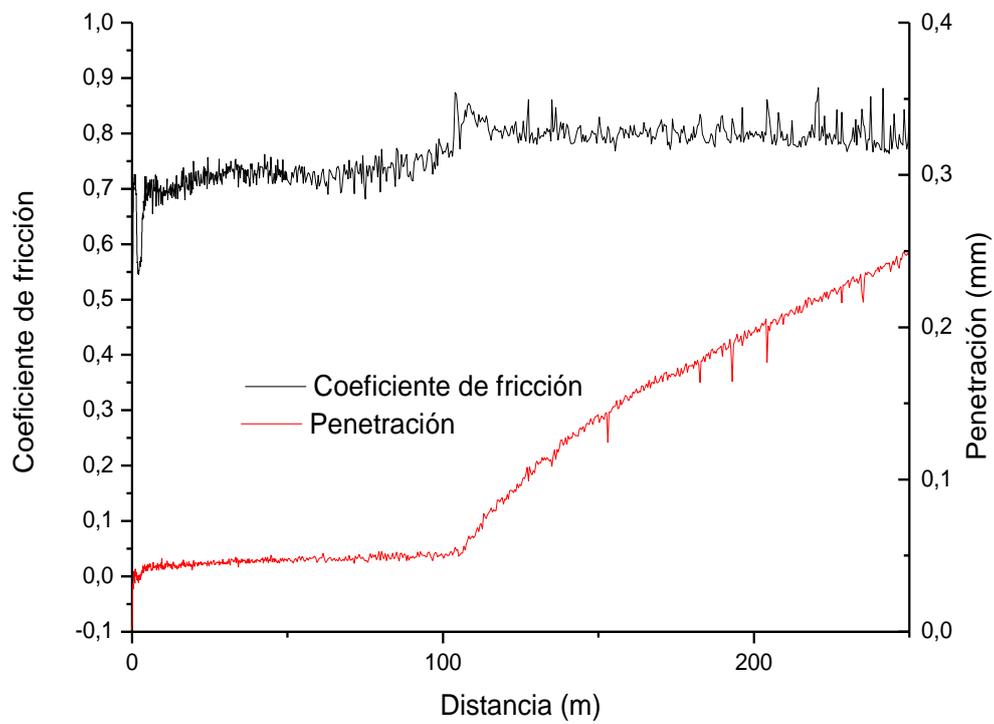
Mezcla Austenítica (550 MPa) - 10 N (Carboximetil 2% - 0.5 horas en EPOVAC)



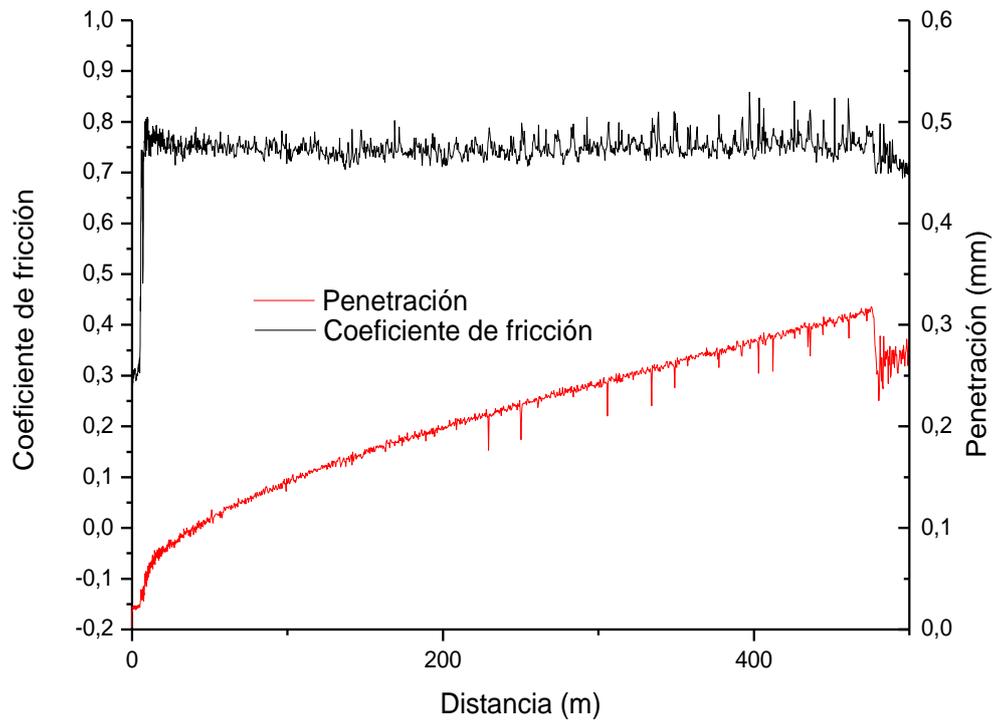
Mezcla Austenítica (550 MPa) - 10 N (Carboximetil 0.5% - 0.5 horas en EPOVAC)



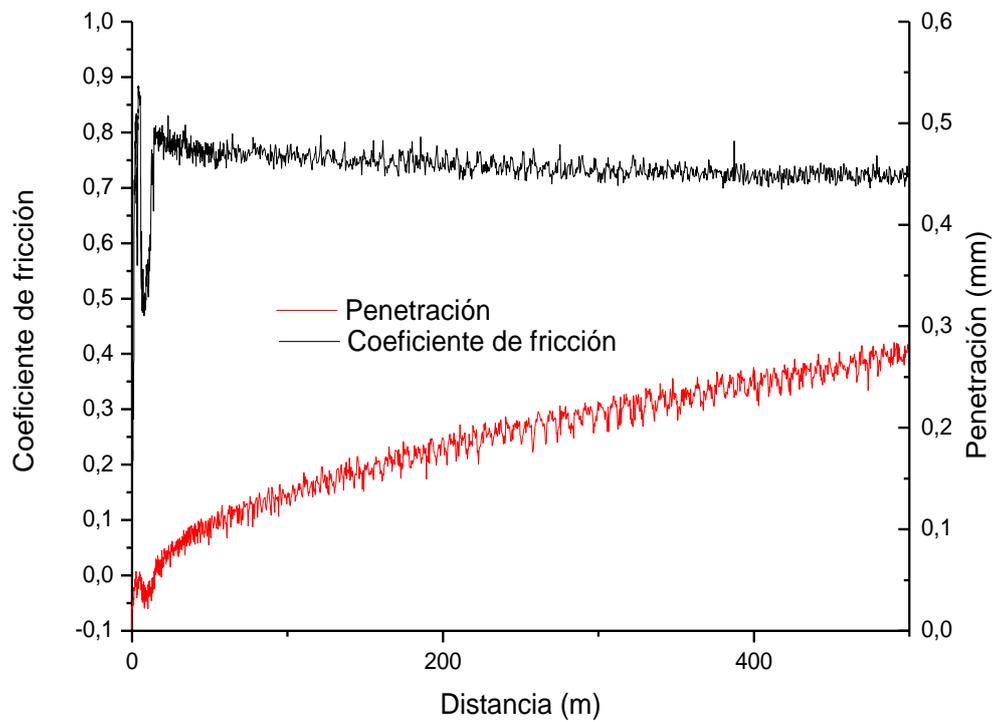
Mezcla Austenítica (550 MPa) - 10 N (Carboximetil 0.5% - 12 horas en EPOVAC)



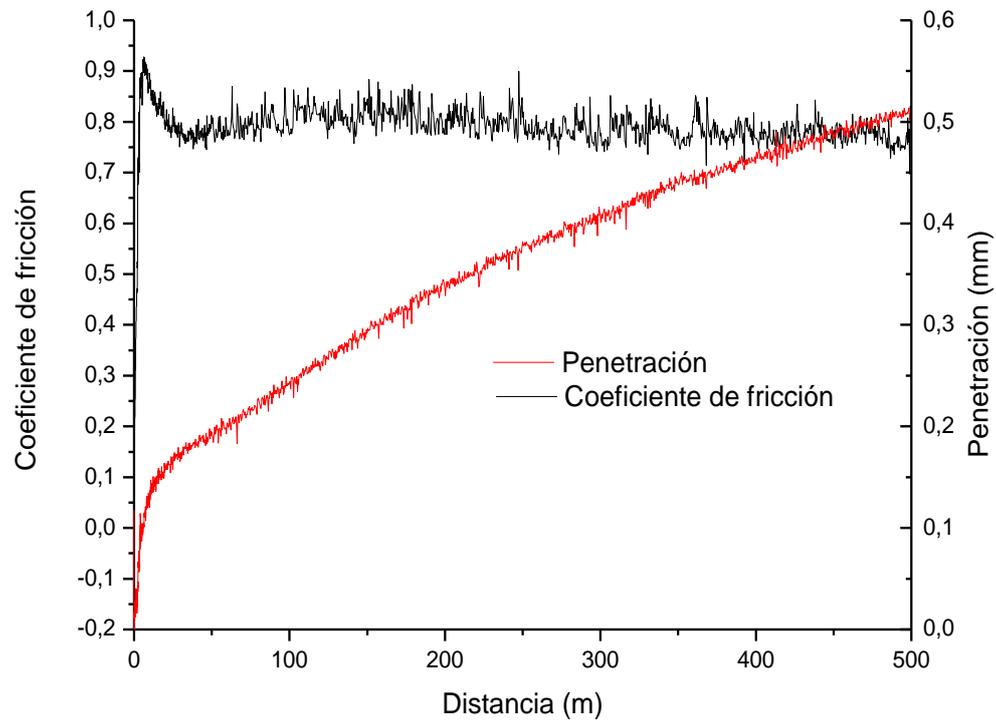
Bicapa 316L [½-½] (750 MPa): Capa 316L [½] - 10 N (Carboximetil 2% - 0.5 horas en EPOVAC)



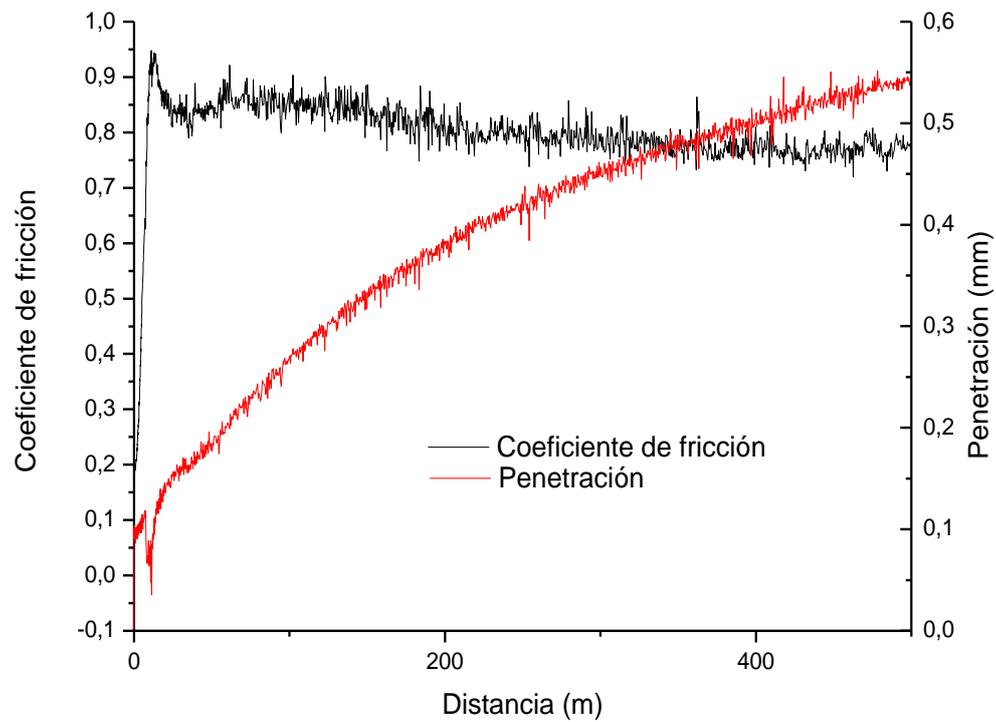
Bicapa 316L [½-½] (750 MPa): Capa Mezcla 316L [½] - 10 N (Carboximetil 2% - 0.5 horas en EPOVAC)



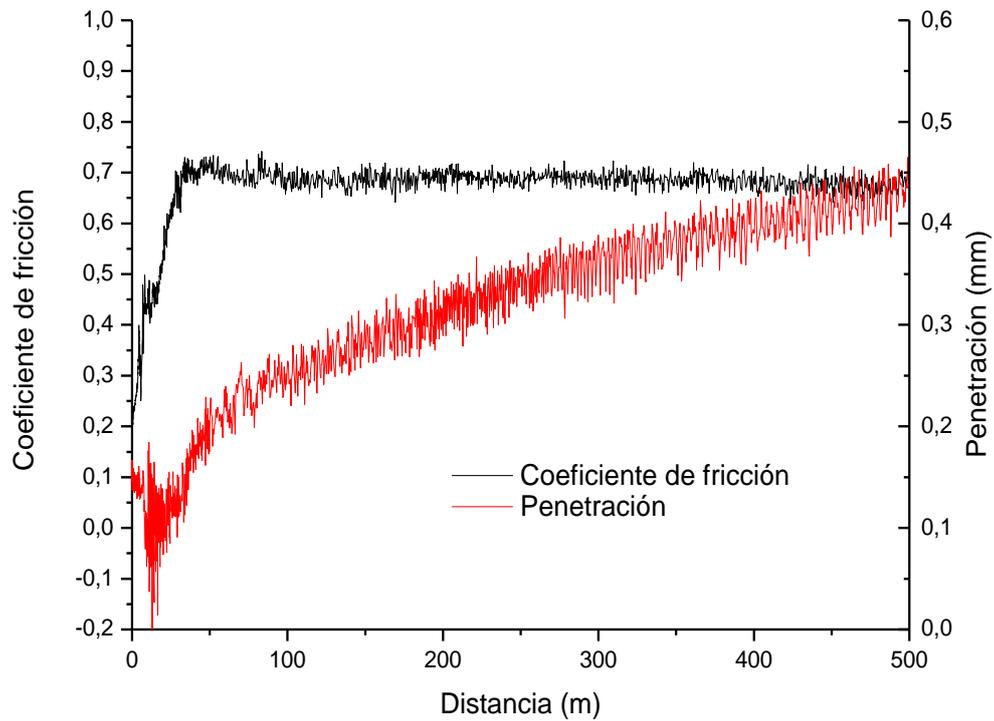
Bicapa 316L [½-½] (550 MPa): Capa 316L [½] - 10 N (Carboximetil 2% - 0.5 horas en EPOVAC)



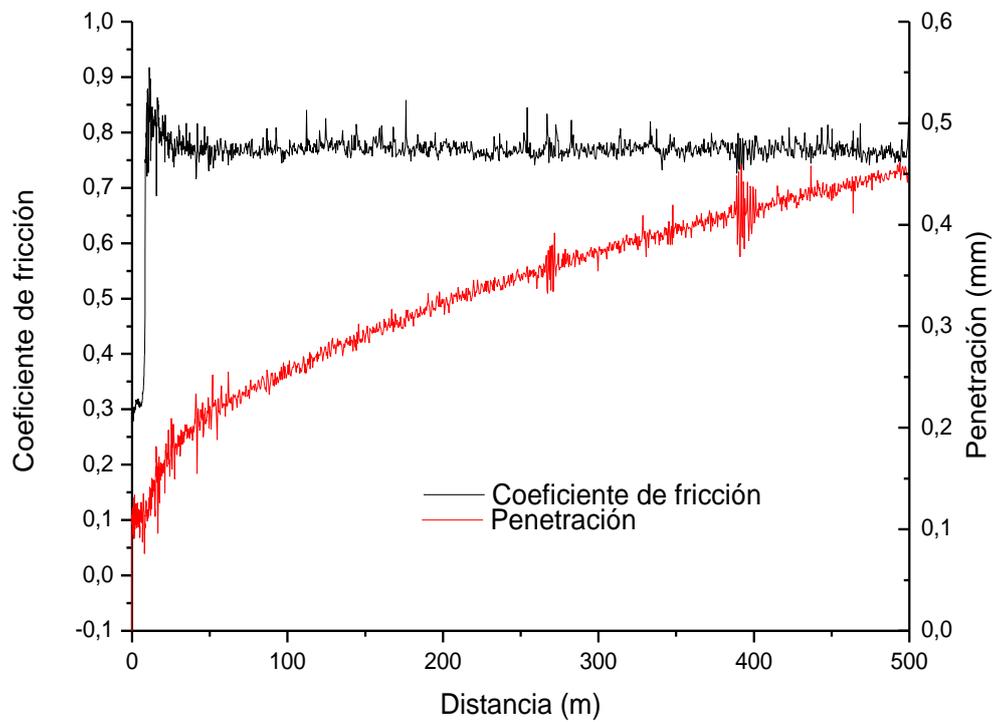
Bicapa 316L [½-½] (550 MPa): Capa Mezcla 316L [½] - 10 N (Carboximetil 2% - 0.5 horas en EPOVAC)



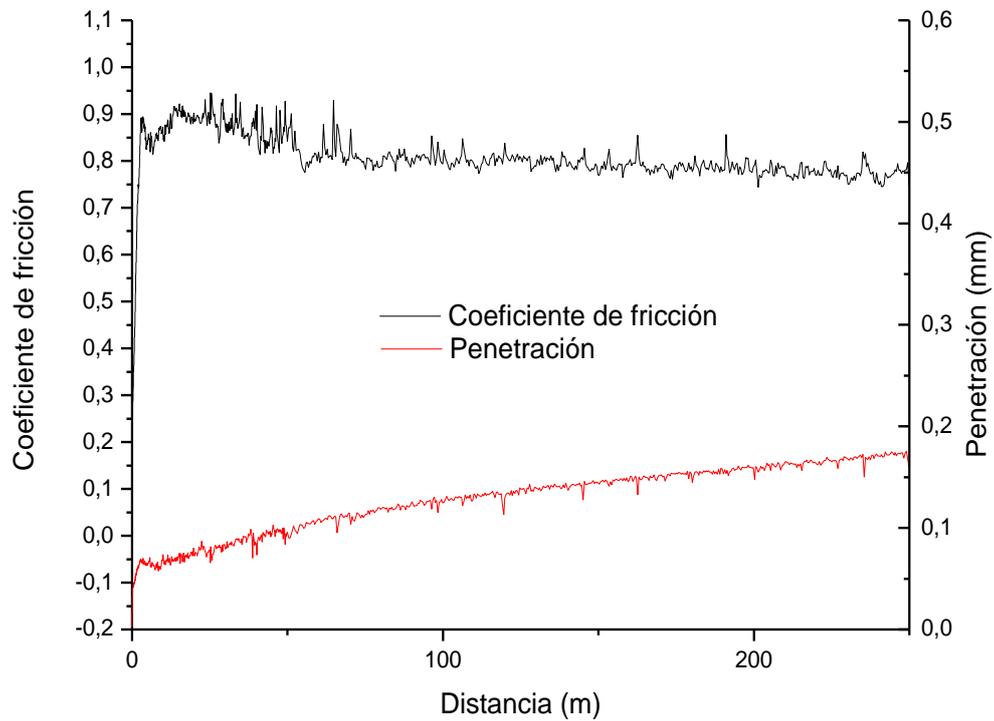
Bicapa 316L [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa): Capa 316L [$\frac{2}{3}$] - 10 N (Carboximetil 2% - 0.5 horas en EPOVAC)



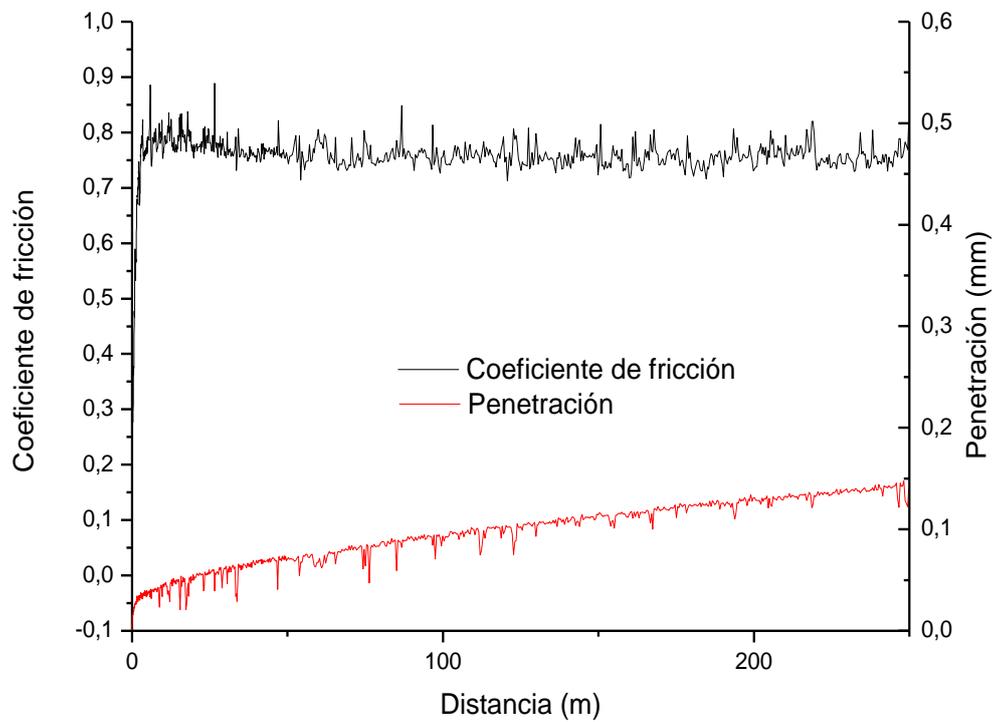
Bicapa 316L [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa): Capa Mezcla 316L [$\frac{1}{3}$] - 10 N (Carboximetil 2% - 0.5 horas en EPOVAC)



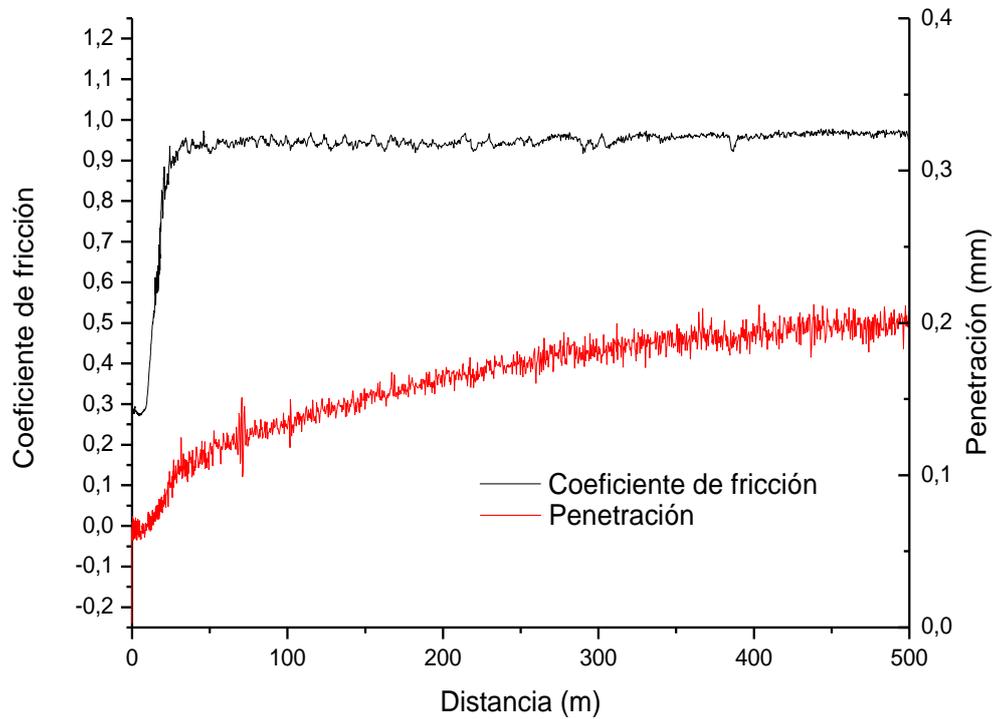
Bicapa 316L [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa): Capa 316L [$\frac{2}{3}$] - 10 N (Carboximetil 0.5% - 12 horas en EPOVAC)



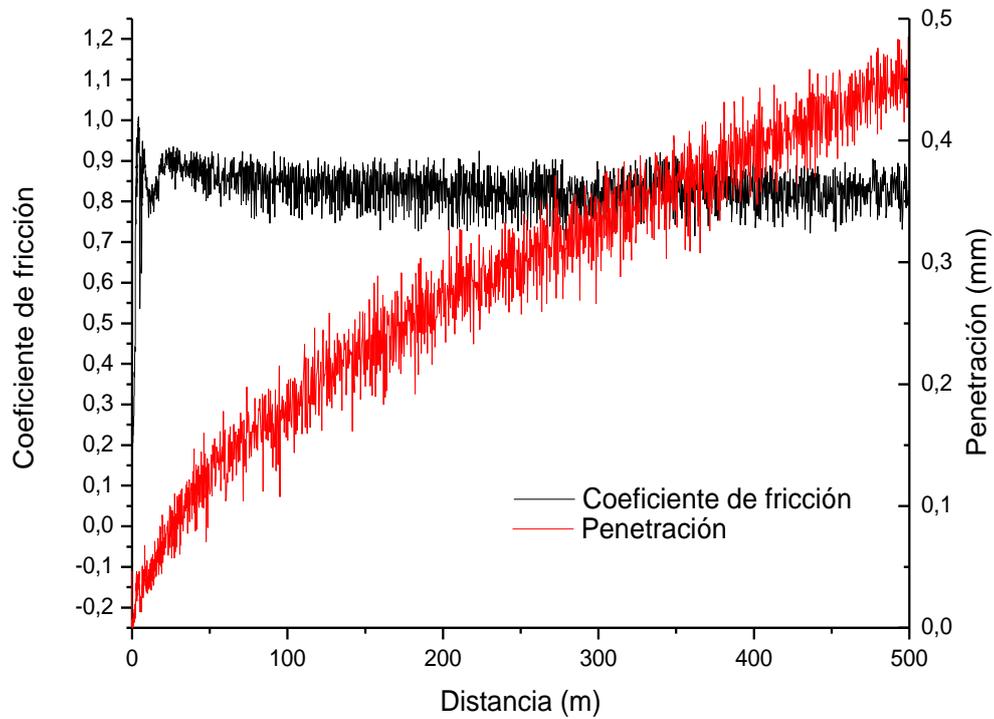
Bicapa 316L [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa): Capa Mezcla 316L [$\frac{1}{3}$] - 10 N (Carboximetil 0.5% - 12 horas en EPOVAC)



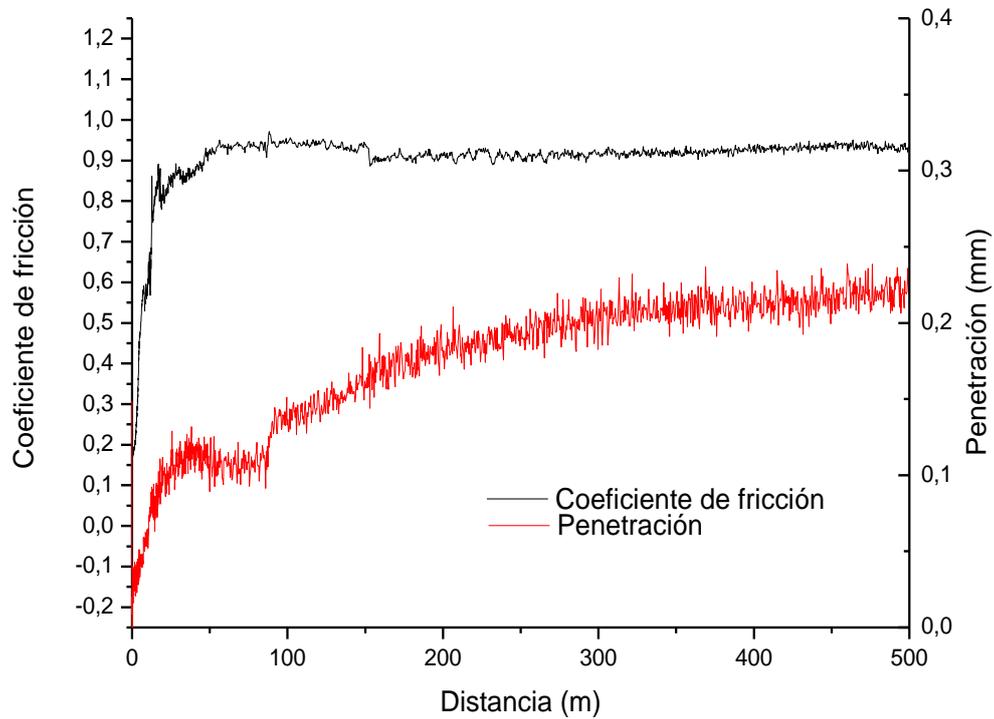
Bicapa 430L [½-½] (750 MPa): Capa 430L [½] - 10 N (Carboximetil 2% - 0.5 horas en EPOVAC)



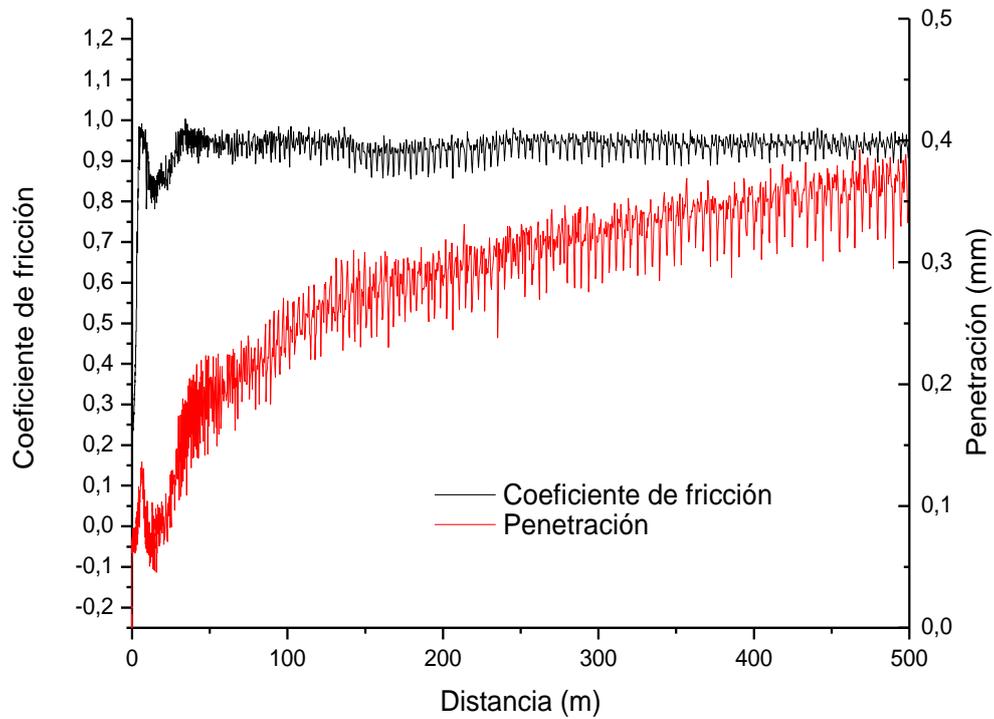
Bicapa 430L [½-½] (750 MPa): Capa Mezcla 430L [½] - 10 N (Carboximetil 2% - 0.5 horas en EPOVAC)



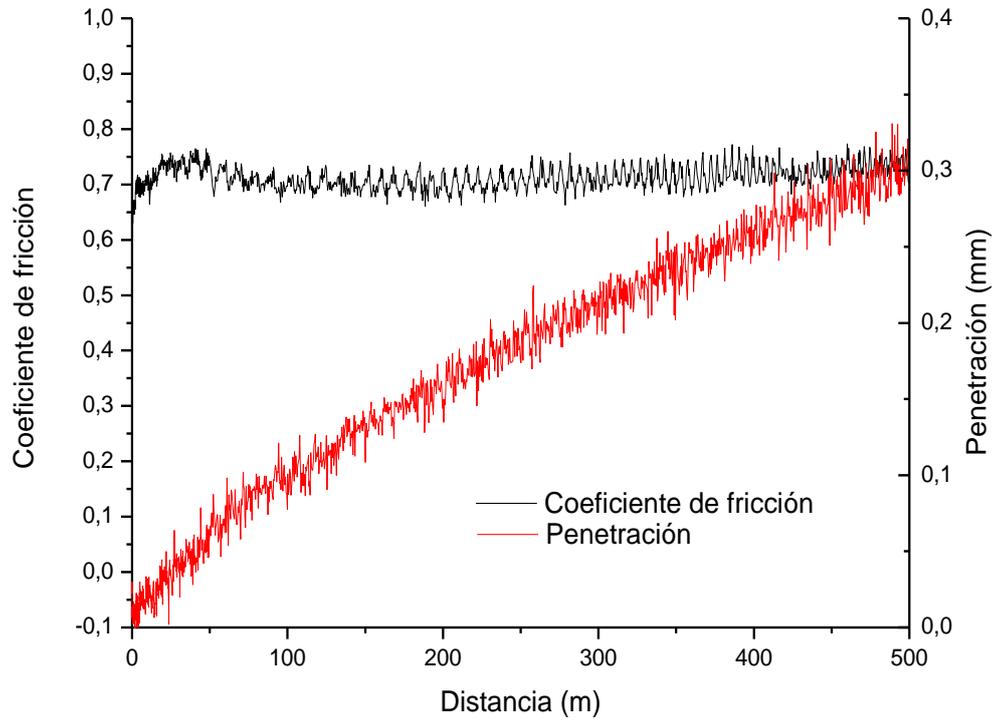
Bicapa 430L [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa): Capa 430L [$\frac{2}{3}$] - 10 N (Carboximetil 2% - 0.5 horas en EPOVAC)



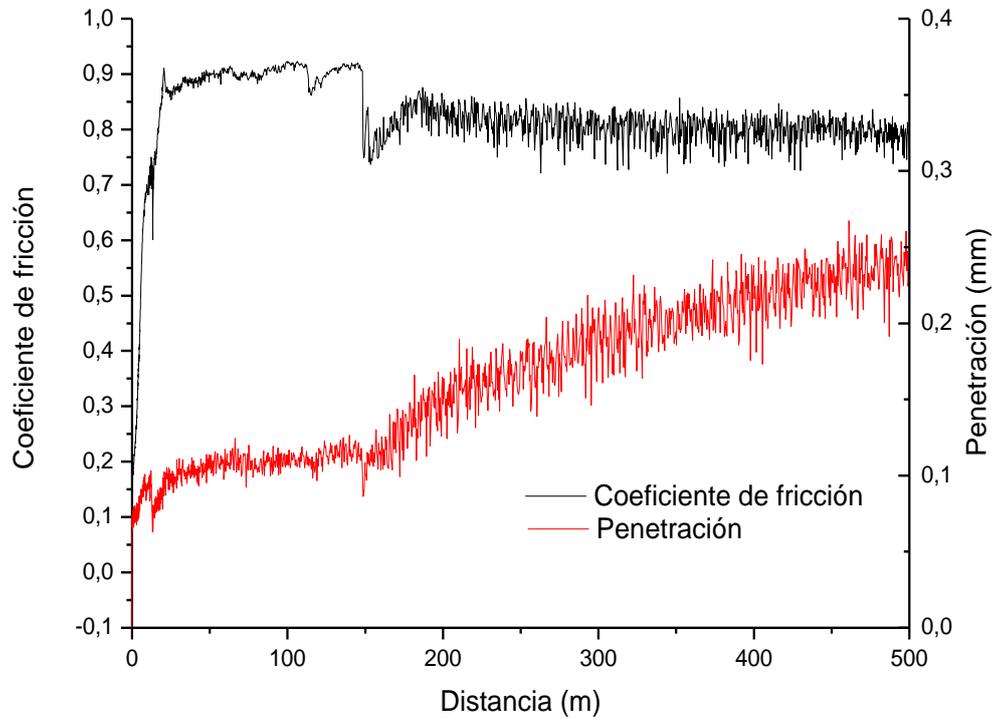
Bicapa 430L [$\frac{2}{3}$ - $\frac{1}{3}$] (750 MPa): Capa Mezcla 430L [$\frac{1}{3}$] - 10 N (Carboximetil 2% - 0.5 horas en EPOVAC)



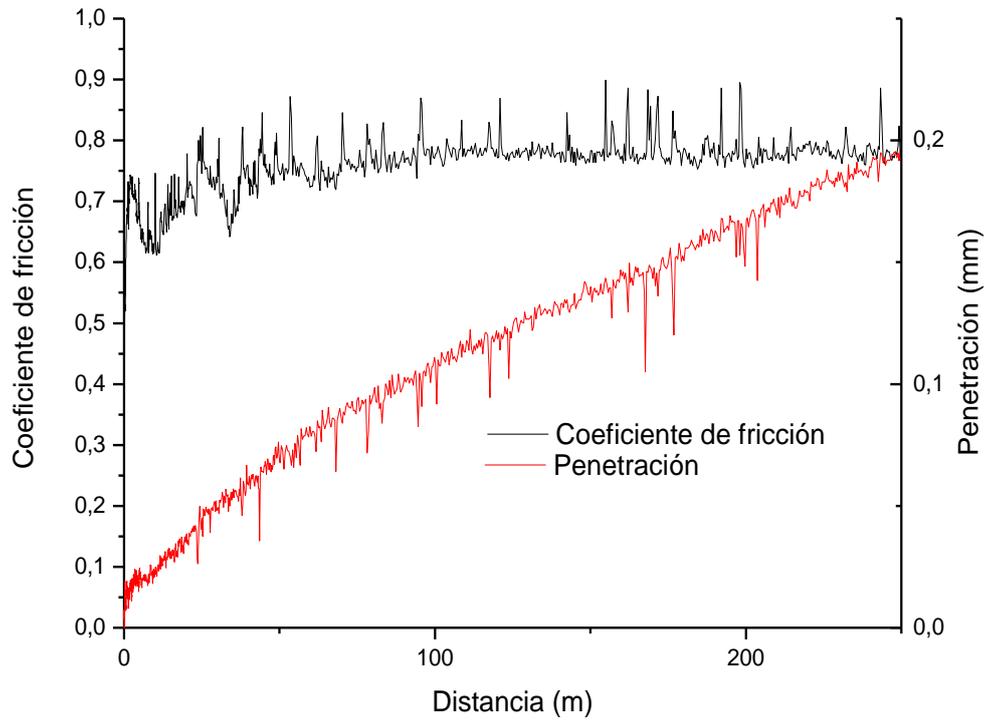
Bicapa 50/50 [2/3-1/3] (750 MPa): Capa 50/50 [2/3] - 10 N (Carboximetil 2% - 0.5 horas en EPOVAC)



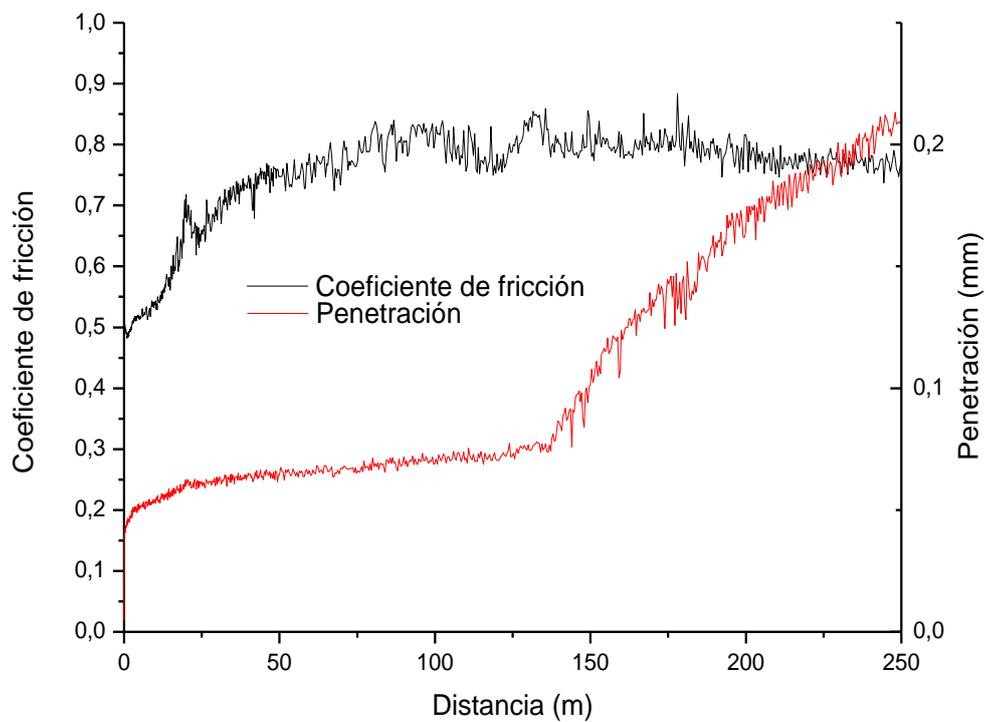
Bicapa 50/50 [2/3-1/3] (750 MPa): Capa Mezcla 50/50 [1/3] - 10 N (Carboximetil 2% - 0.5 horas en EPOVAC)



Bicapa Austenítica [½-½] (550 MPa): Capa 316L [300-500 μm] [½] - 10 N (Carboximetil 0.5% - 12 horas en EPOVAC)



Bicapa Austenítica [½-½] (550 MPa): Capa 316L [500-710 μm] [½] - 10 N (Carboximetil 0.5% - 12 horas en EPOVAC)





Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

PROYECTO FIN DE CARRERA



BIBLIOGRAFÍA



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

PROYECTO FIN DE CARRERA



8 - BIBLIOGRAFÍA

LIBROS DE CONSULTA

- **Elementos de Metalografía y de Acero al Carbono** - R. L. Bernau (*Editorial Andrés Bello*)
- **La Tribología: Ciencia y técnica para el mantenimiento** - Francisco Martínez Pérez (*Limusa*)
- **Tribología Integral** - Francisco Martínez Pérez (*Limusa*)
- **Ciencia en Ingeniería de la superficie de los materiales metálicos** - Alfonso J. Vázquez Vaamonde, Juan J. de Damborenea González (*Consejo Superior de Investigaciones Científicas*)
- **Fundamentos de Biomecánica y Biomateriales** - Proubasta I., Gil J. y Planell JA (*Ergon S.A.*)
- **Corrosion and Degradation of Implant Materials** - Kruger J. (*Syrett and Acharya*)
- **Corrosion Fatigue of 316L Stainless Steel, Co-Cr-Mo alloy and ELI Ti 6Al-4v** - Imam Ma. Fraker AC. C. M. Gilmore (*Syrett and Acharya*)
- **Orthopedic Biomaterials in Research and Practice** - Black J. (*Churchill Livingstone*)
- **Stainless Steels** - Davis J.R. (*ASM International*)
- **Considerations in atmosphere and vacuum sintering** - Herring, D. H. (*Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials*)
- **P/M Technology Trenos 1998** - Johnson, P. K. (*The International Journal of Powder Metallurgy*)
- **Los aceros inoxidables** - Gsgrielle Di Caprio (*Grupinox*)
- **Powder Metallurgy** - Enrico Mosca (*Associazione Industriali Metallurgici Meccanici Affini*)
- **Powder Metallurgy Stainless Steels: Processing, microstructures and properties** - Erhard Klar, Prasan Ssamal (*The Materials Information Society*)
- **Standard Test Methods for Metal Powders and Powder Metallurgy Products** - Metal Powder (*Metal Powder Industries Federation*)
- **Metallurgy: Science, Technology and Applications** - P. C. Angelo, R. Subramanian (*PHI*)
- **Medical Device Materials** - Sanjay Shrivastava (*ASM International*)
- **Source Book on Stainless Steels** - American Society for Metals (*ASM Engineering Bookshelf*)



NORMATIVA

- **ASTM STANDARD B 721-91** - Standard Test Method for Microhardness and Case Depth of Powder Metallurgy (P/M) Parts
- **ASTM STANDARD G 99-05** - Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus
- **ASTM STANDARD A 763-93** - Standard Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Ferric Stainless Steels.
- **ASTM STANDARD E 112-88** - Standard Test Methods for Determining Average Grain Size
- **UNE 7054:1973** – Determinación de la dureza en productos de acero por el método Vickers

ARTÍCULOS

- **Characteristic of the porous 316 stainless steel for the friction element of prosthetic joint** - Małgorzata Grądzka-Dahlke, Jan R. Dąbrowski, Bogdan Dąbrowski (*Białystok Technical University: Faculty of Mechanical Engineering - Białystok, Poland*)
- **Fabrication methods of porous metals for use in orthopaedic applications** - Garrett Ryan, Abhay Pandit, Dimitrios Panagiotis Apatsidis (*National University of Ireland: Department of Mechanical and Biomedical Engineering - Nun's Island, Galway, Ireland*)
- **Diseño y desarrollo de aceros inoxidables duplex con bajo contenido en níquel** - Carlos del Campo Díaz (*Universidad Politécnica de Madrid - Madrid, España*)
- **Sintered duplex stainless steels from premixes of 316L and 434L powders** - Department of Materials and Metallurgical Engineering (*Indian Institute of Technology - Kanpur, India*)
- **Microstructure and Properties of Modern P/M Super Duplex Stainless Steels** - Olena Smuk (*Royal Institute of Technology: Department of Materials Science and Engineering - Stockholm, Sweden*)



EQUIPOS UTILIZADOS



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

PROYECTO FIN DE CARRERA



9 – EQUIPOS UTILIZADOS

PRENSA HIDRÁULICA: Shimadzu UH

TRONZADORA METALGRÁFICA DE PRECISIÓN: Struers Accutom-5

PRENSA METALGRÁFICA: Struers Predopress

HORNO: Carbolite CSF1200

DESBASTADORAS MECÁNICAS: Buehler Metaserv 2000 y Struers Knuth-Rotor 2

EQUIPO DE LIMPIEZA POR ULTRASONIDOS: Buehler Ultramet II

PULIDORA MECÁNICA: Buehler Metaserv

BÁSCULA DIGITAL: Denver Instrument AA-200

LIJADORA DE CINTA: Super Lema

TALADRADORA: Ibarria KS-18

EQUIPO ELECTROLÍTICO: Struers Polectrol

MICROSCOPIO: Nikon Optiphot 100

MICRODURÓMETRO: Matsuzawa Micro Hardness Tester MXT 70

DURÓMETRO: Centaur Hardness Tester RB2

SOFTWARE DE ANÁLISIS DE IMAGEN: Buehler OmniMet 9.0

AGITADOR: Agimatic-S

EQUIPO DE IMPREGNACIÓN AL VACÍO: Struers Epovac

TRIBÓMETRO: Microtest MT/30/NI



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

PROYECTO FIN DE CARRERA