

2016

Entregable 3

Selección y caracterización de materiales

TIFANI: MEJORA DE PROPIEDADES A TRAVÉS DE
TRATAMIENTOS TÉRMICOS SOBRE ALEACIONES DE
TITANIO FABRICADAS MEDIANTE HAZ DE ELECTRONES

Contenido

Contenido	2
1. Objetivos	3
2. Actividades realizadas	3
3. Resultados	3
4. Aplicaciones	16
5. Resumen. Conclusiones	17
6. Anexos	17

Tratamientos térmicos de aleaciones de Ti

1. Objetivos

Paquete de trabajo Nº 3

Objetivo 1: Encontrar cuál de las características metalográficas son las que más afectan a las propiedades mecánicas de las aleaciones fabricadas por haz de electrones.

2. Actividades realizadas

Tarea 3.1: Caracterización microestructural.

Se ha procedido a la realización de inspecciones metalográficas y mediciones microestructurales para poder relacionar éstas con las propiedades mecánicas. Se han evaluado las siguientes características.

- Tamaño de grano.
- Tamaño de borde de grano.
- Tamaño de colonias alfa.
- Tamaño de platos/lamelas alfa.

Adicionalmente, se obtuvieron imágenes por microscopía electrónica de barrido, con el fin de identificar aspectos microestructurales con más detalle.

Tarea 3.2: Caracterización mecánica.

La caracterización mecánica se ha obtenido mediante ensayo de compresión. Para zonas puntuales se han realizado las medidas de dureza.

Tarea 3.3: Caracterización térmica.

La caracterización térmica permitió identificar las temperaturas de transformación microestructural (α -transus y β -transus), ya que afectan enormemente a las transformaciones microestructurales, y por ende, a las características mecánicas del material estudiado.

3. Resultados

Tarea 3.1: Caracterización microestructural.

La caracterización microestructural permitió comparar el comportamiento de los cuatro parámetros estudiados en función del tratamiento térmico aplicado.

En todos los casos, se produce un aumento, en términos absolutos, de las dimensiones estudiadas.

Así, en el caso del **tamaño de grano**, el aumento experimentado se presenta en la siguiente tabla y gráfico.

TAMAÑO DE GRANO/MAX FERET 90 (μm)		
850°C	940°C	1 060°C
Tratamiento sub α-transus	Tratamiento inter transus	Tratamiento super β-transus
56,70 ± 32,19	188,79 ± 107,34	510,89 ± 203,16

La incertidumbre expandida (U) se ha obtenido multiplicando la incertidumbre típica combinada por el factor de cobertura k=2 que, para una distribución normal, corresponde a una probabilidad de aproximadamente el 95%.

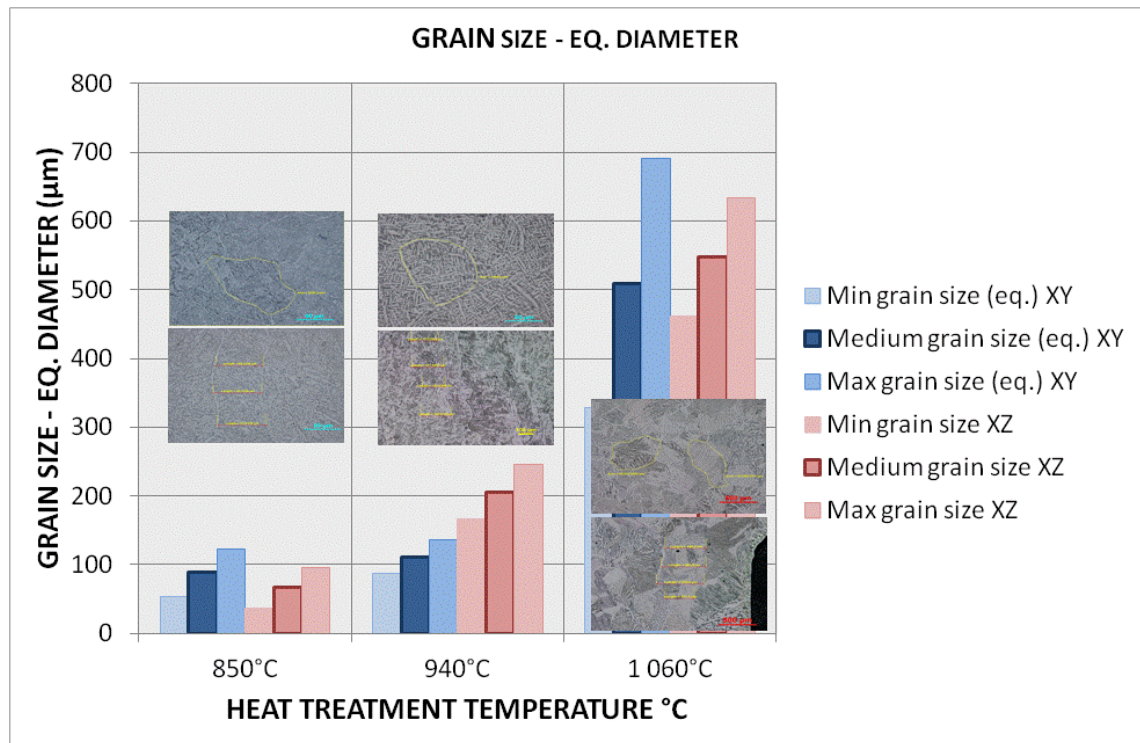


Figura nº 1. Evolución del tamaño de grano en función del tratamiento térmico aplicado.

Se aprecia un aumento progresivo y proporcional, tanto en el plano XY como en el plano XZ del tamaño de grano. En el caso del tratamiento “inter transus” (940°C), el aumento del tamaño de grano es de un 333% respecto del tamaño original “sub α-transus” (850°C). En el caso del tratamiento “super transus” (1 060°C), el aumento del tamaño de grano es de un 901% respecto del tamaño original (850°C).

La distribución normal del tamaño de grano en función del tratamiento térmico aplicado se puede observar en la siguiente imagen.

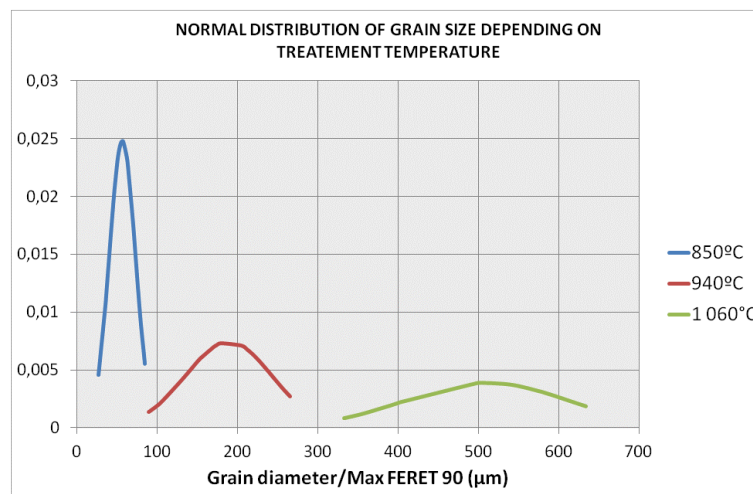


Figura nº 2. Distribución normal del tamaño de grano.

En el caso del **borde de grano**, el aumento experimentado se presenta en la siguiente tabla y gráfico.

TAMAÑO DE GRANO/MAX FERET 90 (μm)		
850°C	940°C	1 060°C
Tratamiento sub α-transus	Tratamiento inter transus	Tratamiento super β-transus
2,85 ± 1,04	5,19 ± 1,29	15,21 ± 5,67

La incertidumbre expandida (U) se ha obtenido multiplicando la incertidumbre típica combinada por el factor de cobertura k=2 que, para una distribución normal, corresponde a una probabilidad de aproximadamente el 95%.

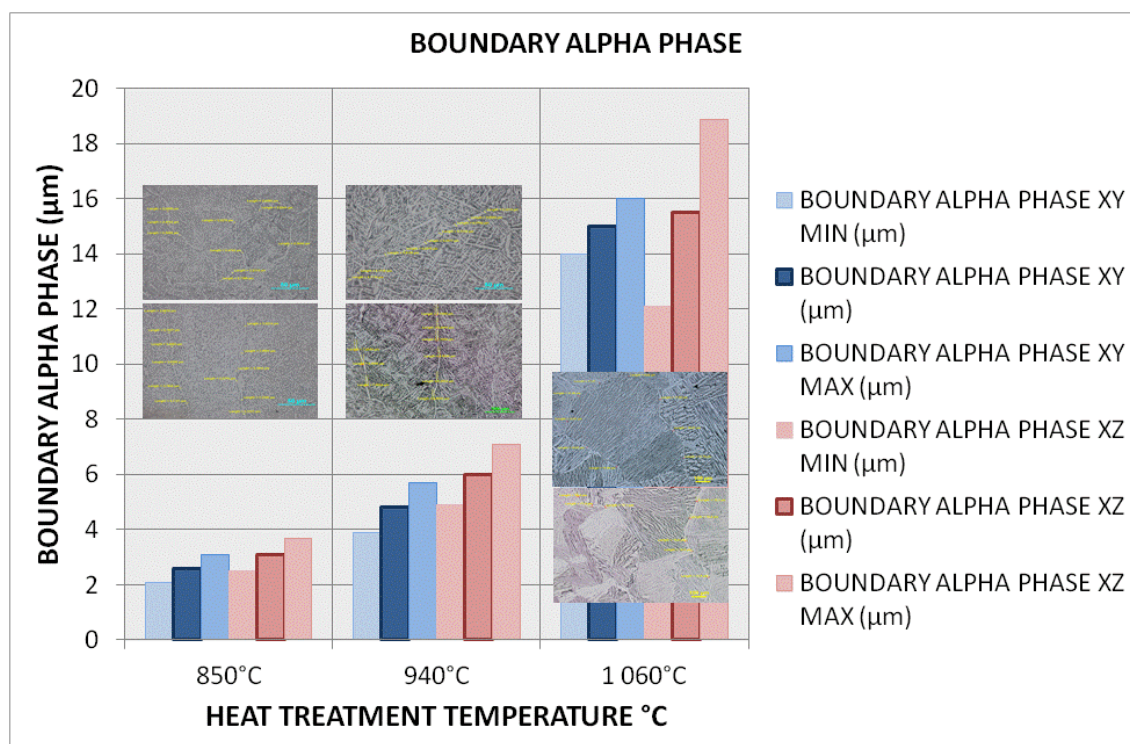


Figura nº 3. Evolución del borde de grano en función del tratamiento térmico aplicado.

Se aprecia un aumento progresivo y proporcional, tanto en el plano XY como en el plano XZ del borde de grano. En el caso del tratamiento “inter transus” (940°C), el aumento del borde de grano es de un 182% respecto del tamaño original “sub α -transus” (850°C). En el caso del tratamiento “super transus” (1 060°C), el aumento del borde de grano es de un 534% respecto del tamaño original (850°C).

La distribución normal del tamaño de grano en función del tratamiento térmico aplicado se puede observar en la siguiente imagen.

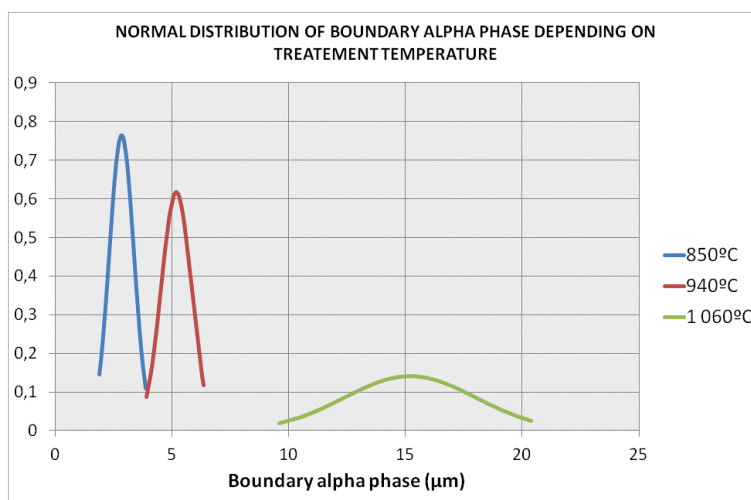


Figura nº 4. Distribución normal del borde de grano.

Las **colonias alpha**, no experimentan prácticamente variación por debajo de la temperatura de transformación β . Por encima de esta temperatura se experimenta un considerable aumento, tanto en número como en área, tal como se muestra en la tabla y figura siguiente.

TAMAÑO DE COLONIAS ALPHA/MAX FERET 90 (µm)		
850°C	940°C	1 060°C
Tratamiento sub α -transus	Tratamiento inter transus	Tratamiento super β -transus
48,6 ± 40,57	47,03 ± 31,27	179,44 ± 138,52

La incertidumbre expandida (U) se ha obtenido multiplicando la incertidumbre típica combinada por el factor de cobertura k=2 que, para una distribución normal, corresponde a una probabilidad de aproximadamente el 95%.

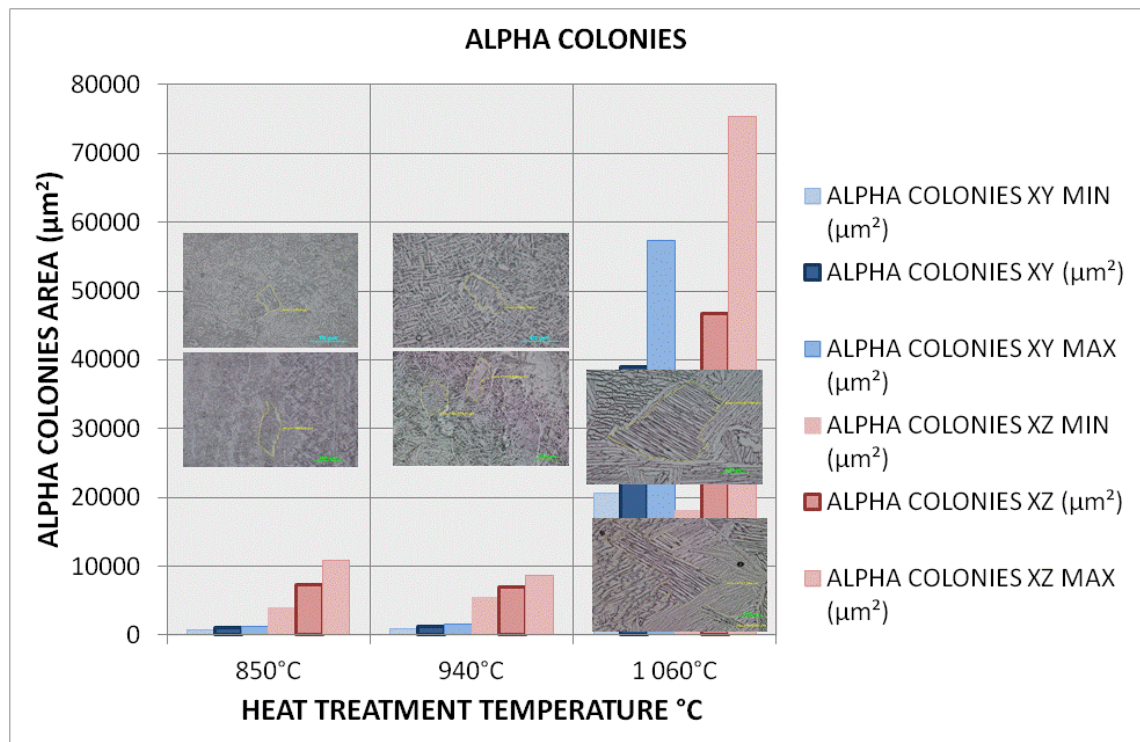


Figura nº 5. Evolución del tamaño de colonias alpha en función del tratamiento térmico aplicado.

En el caso del tratamiento “super transus” (1 060°C), el aumento del área de las colonias alpha es de un 369% respecto del tamaño original (850°C).

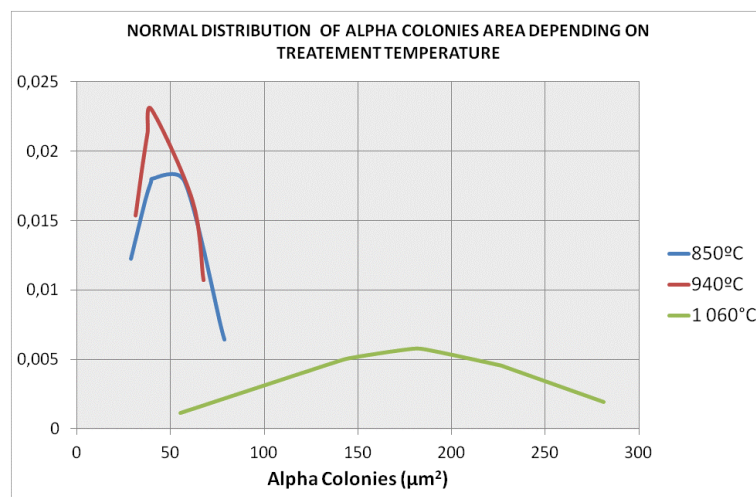


Figura nº 6. Distribución normal del tamaño de colonias alpha.

Por último, se analizó el tamaño de las **placas alpha**, el aumento experimentado se presenta en la siguiente tabla y gráfico.

TAMAÑO DE GRANO/MAX FERET 90 (µm)		
850°C	940°C	1 060°C
Tratamiento sub α-transus	Tratamiento inter transus	Tratamiento super β-transus
1,88 ± 0,54	3,20 ± 1,13	9,53 ± 3,98

La incertidumbre expandida (U) se ha obtenido multiplicando la incertidumbre típica combinada por el factor de cobertura k=2 que, para una distribución normal, corresponde a una probabilidad de aproximadamente el 95%.

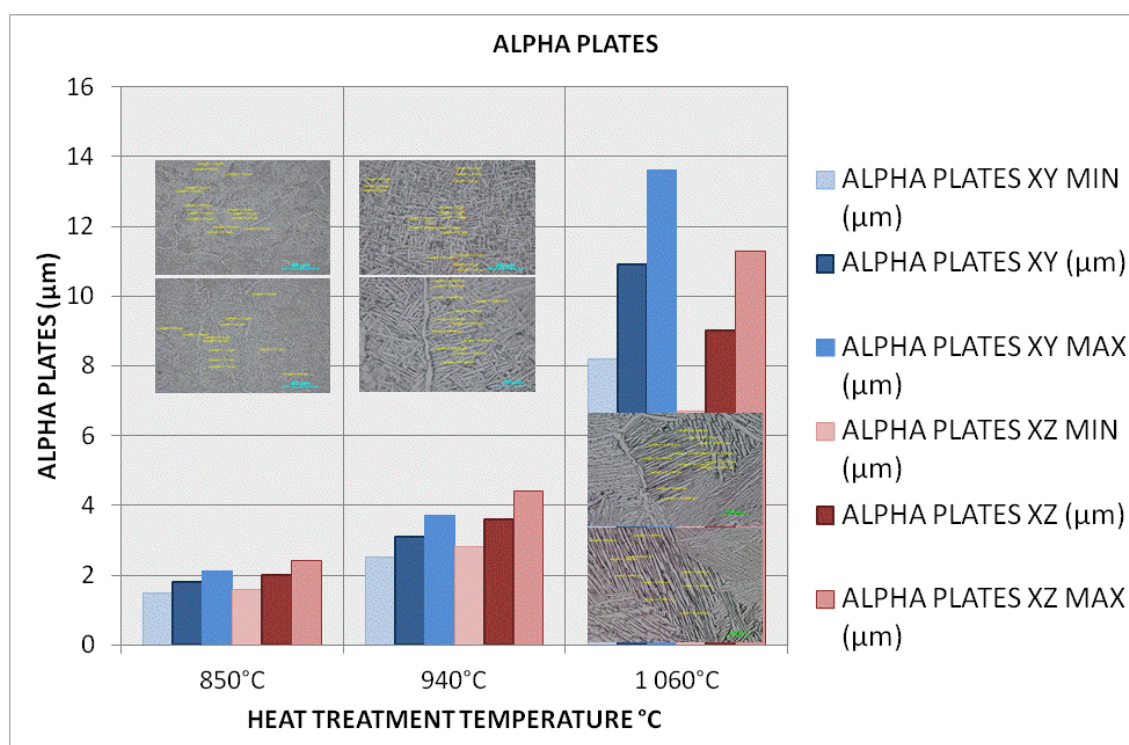


Figura nº 7. Evolución del tamaño de placas alpha en función del tratamiento térmico aplicado.

Se aprecia un aumento progresivo y proporcional, tanto en el plano XY como en el plano XZ de las placas alpha. En el caso del tratamiento “inter transus” (940°C), el aumento de las placas alpha es de un 170% respecto del tamaño original “sub α-transus” (850°C). En el caso del tratamiento “super transus” (1 060°C), el aumento de las placas alpha es de un 506% respecto del tamaño original (850°C).

La distribución normal de las placas alpha en función del tratamiento térmico aplicado se puede observar en la siguiente imagen.

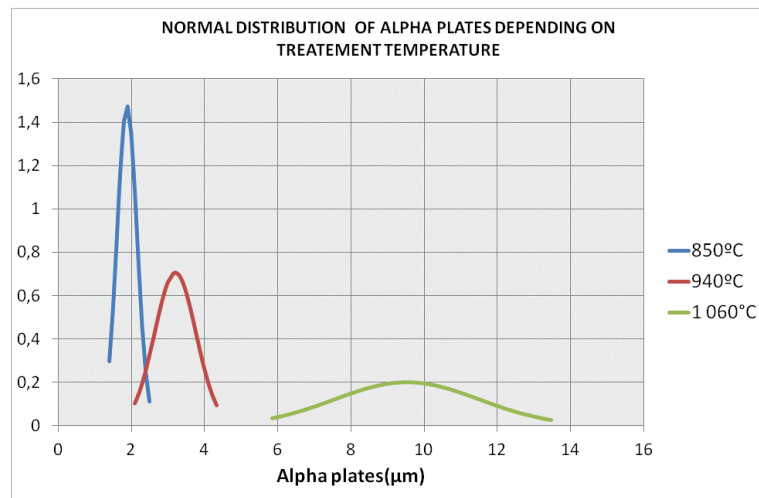
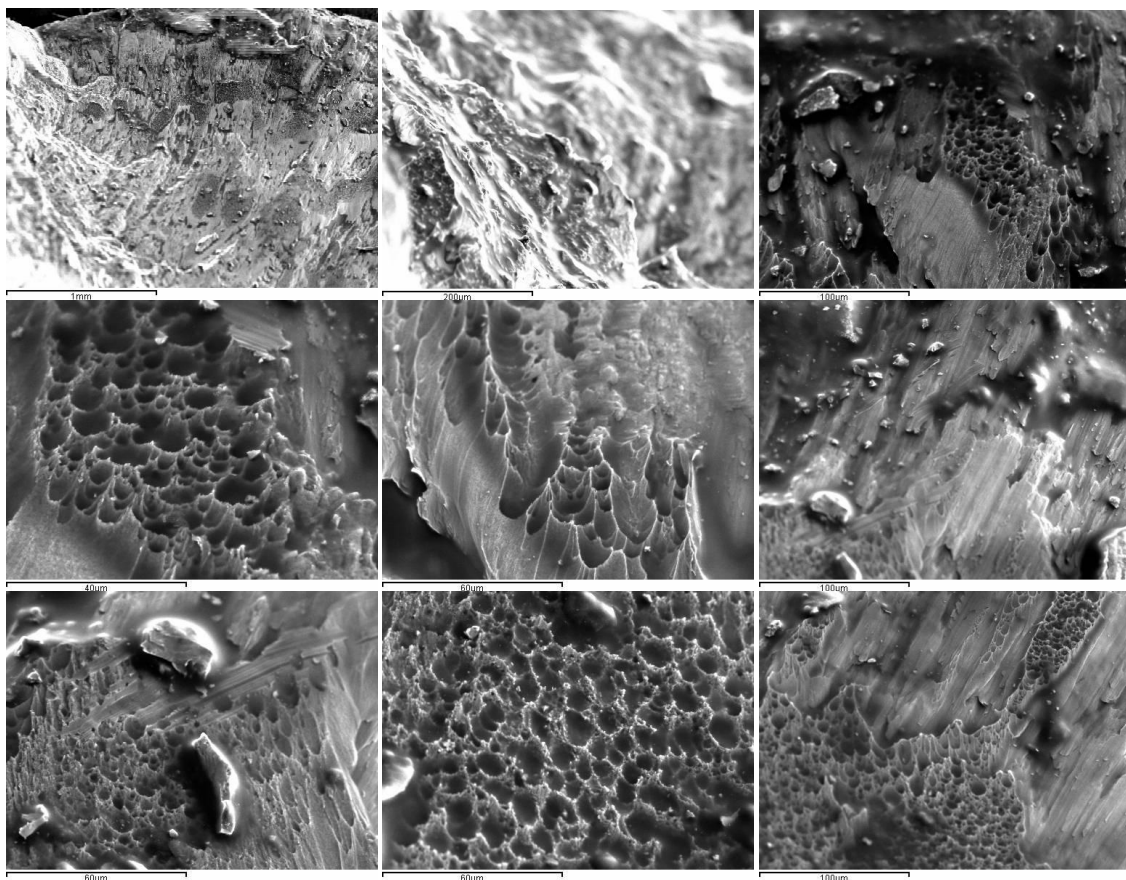
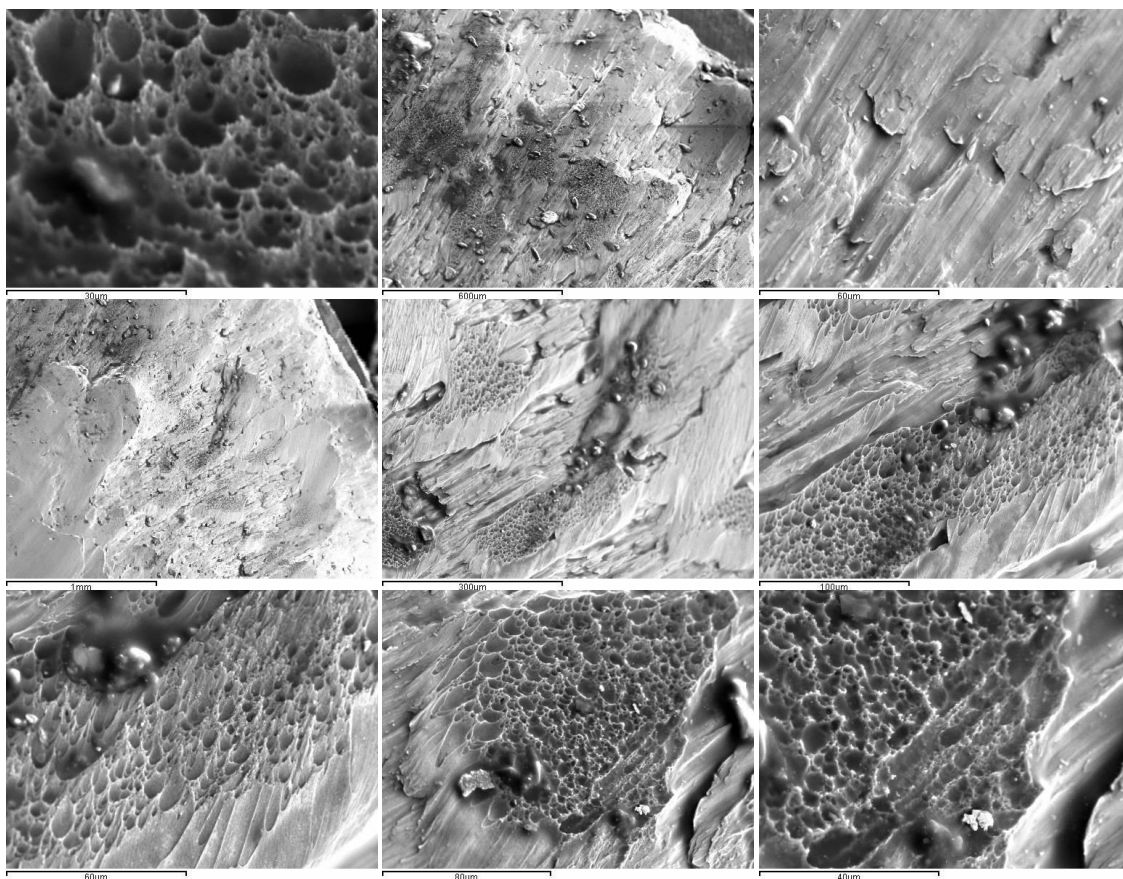


Figura nº 8. Distribución normal del tamaño de placas alpha.

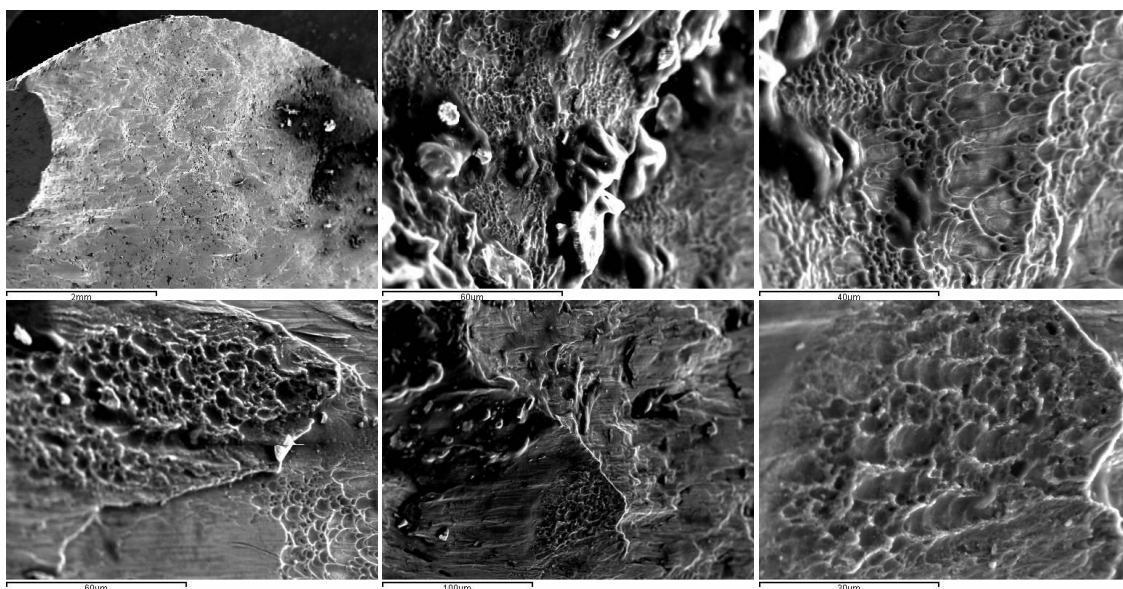
En las imágenes siguientes se aprecian las imágenes obtenidas por microscopía electrónica de barrido.

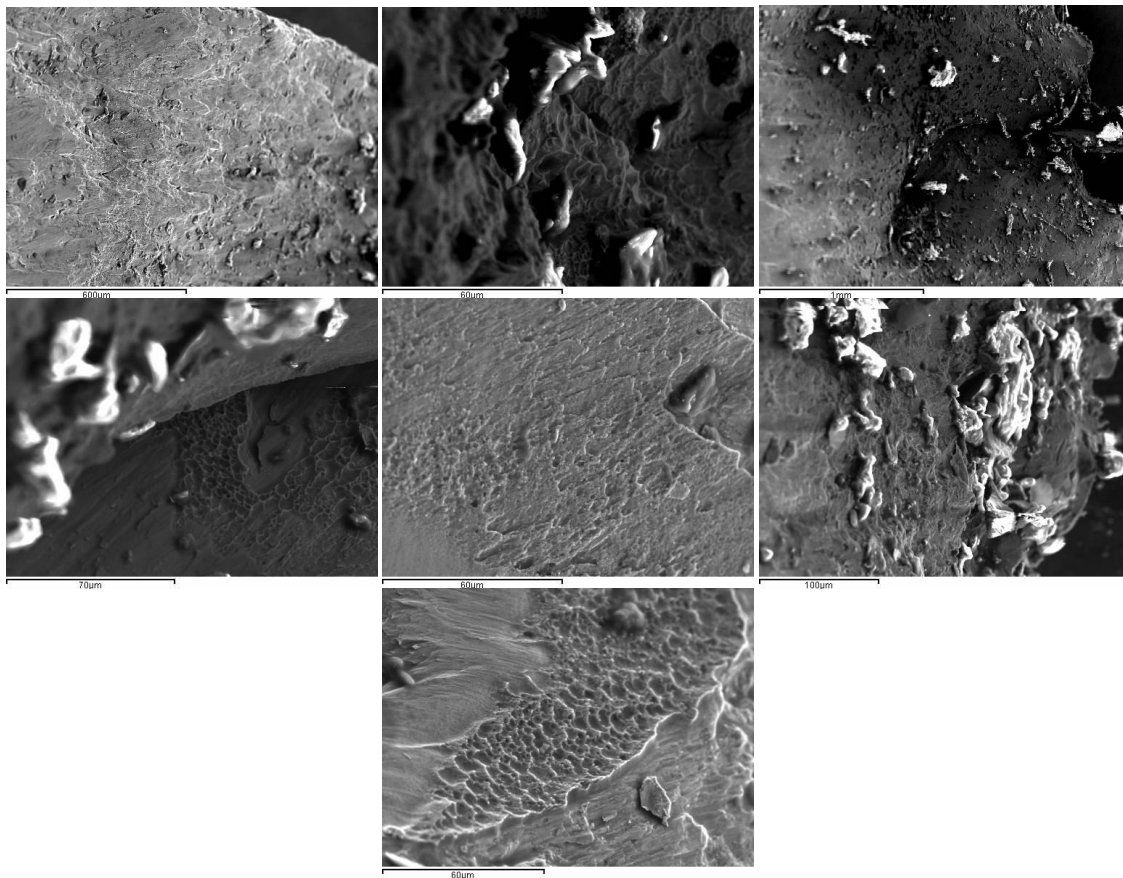
Muestra tratada a 850°C



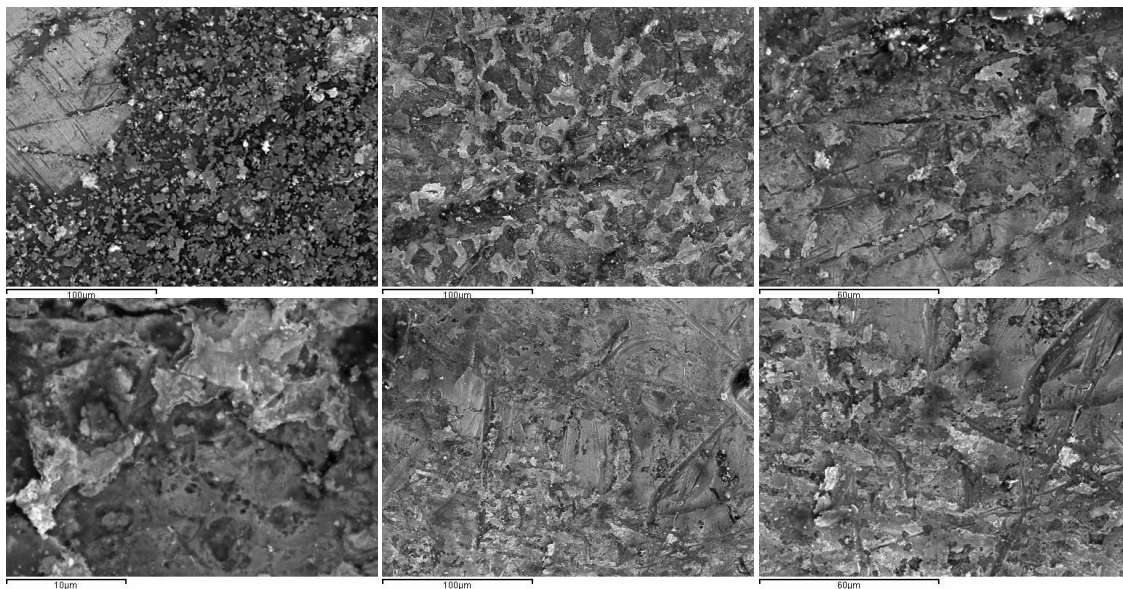


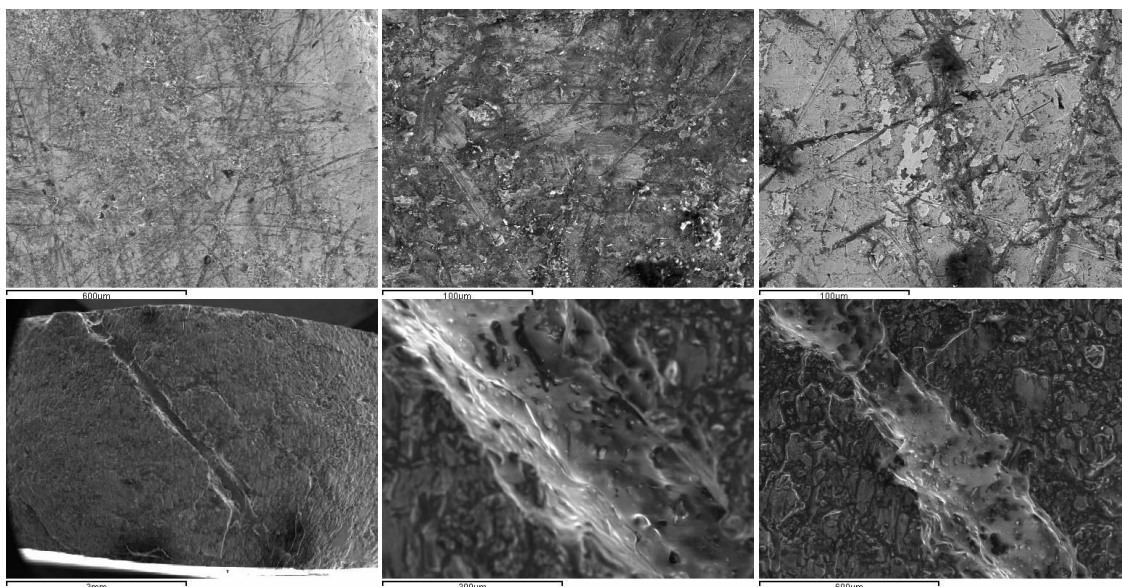
Muestra tratada a 940°C





Muestra tratada a 1 060°C





Análisis químicos

Se analizaron químicamente las aleaciones procesadas para ver la evolución de los tratamientos.

%	Al	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Pb	Si	Sn	Zr	Ti	V
A	5,750	0,004	0,003	0,103	0,006	0,012	0,006	0,022	0,015	0,013	0,003	89,700	4,370
B 850	5,680	0,005	0,003	0,113	0,006	0,012	0,005	0,021	0,014	0,015	0,003	89,800	4,320
D 1060	5,740	0,005	0,003	0,108	0,006	0,012	0,007	0,020	0,019	0,012	0,004	89,900	4,230
F 940	5,600	0,008	0,003	0,130	0,006	0,012	0,003	0,023	0,009	0,015	0,003	88,800	5,420
Media	5,678	0,005	0,003	0,113	0,006	0,012	0,005	0,022	0,014	0,014	0,003	89,600	4,546

Tarea 3.2: Caracterización mecánica.

La caracterización mecánica permitió comparar la evolución del módulo elástico de la aleación en función del tratamiento térmico aplicado y la dirección de fabricación.

En general, la aleación original (sin tratamiento térmico) y aquella tratada por debajo de la temperatura de transformación α (850°C) presentan una anisotropía superior al 20% medido como módulo elástico.

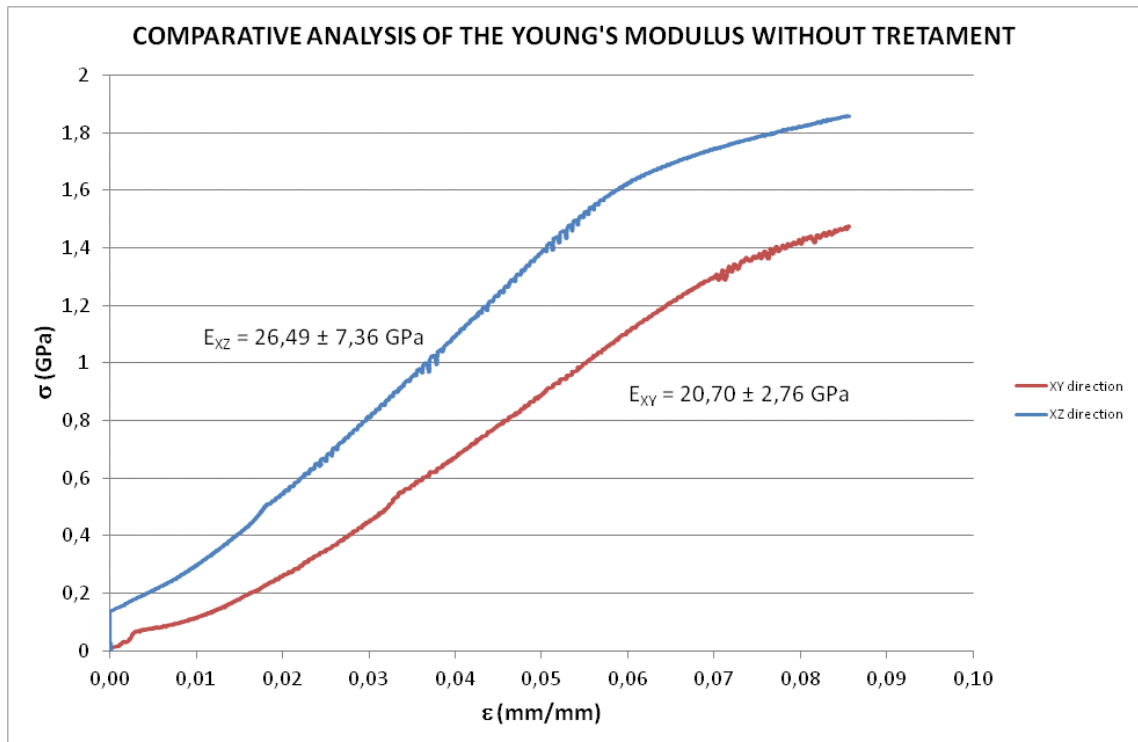


Figura nº 9. Diferencia de módulo elástico según dirección de fabricación.

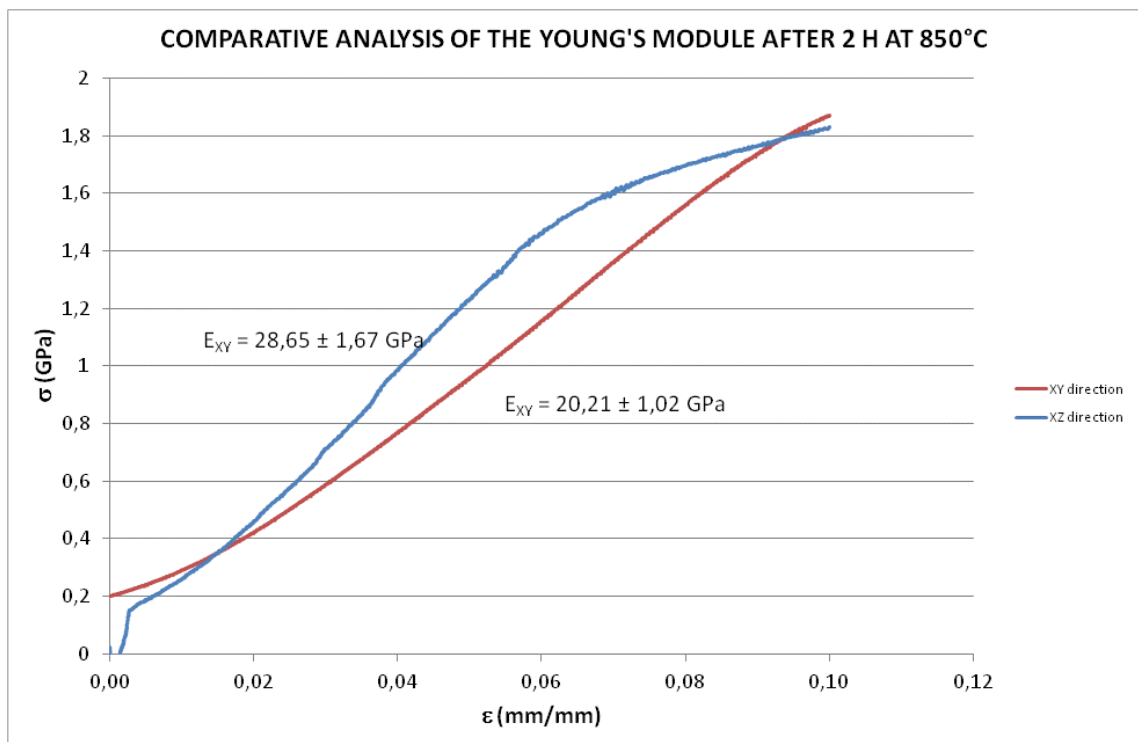
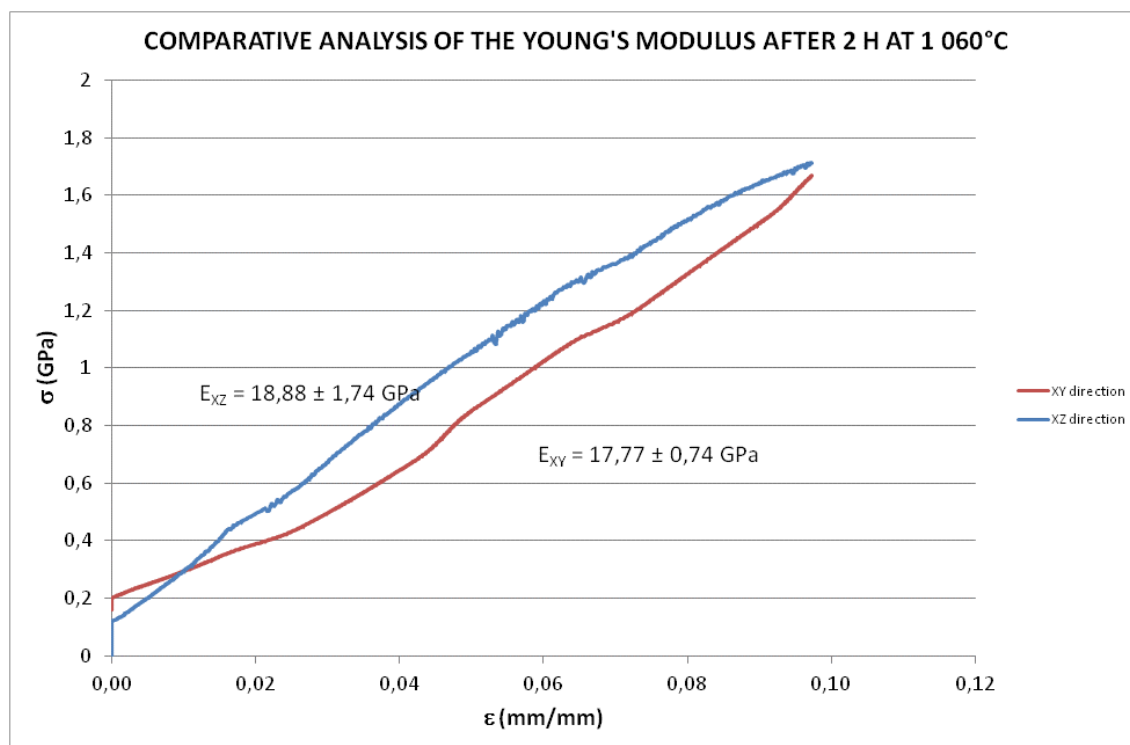
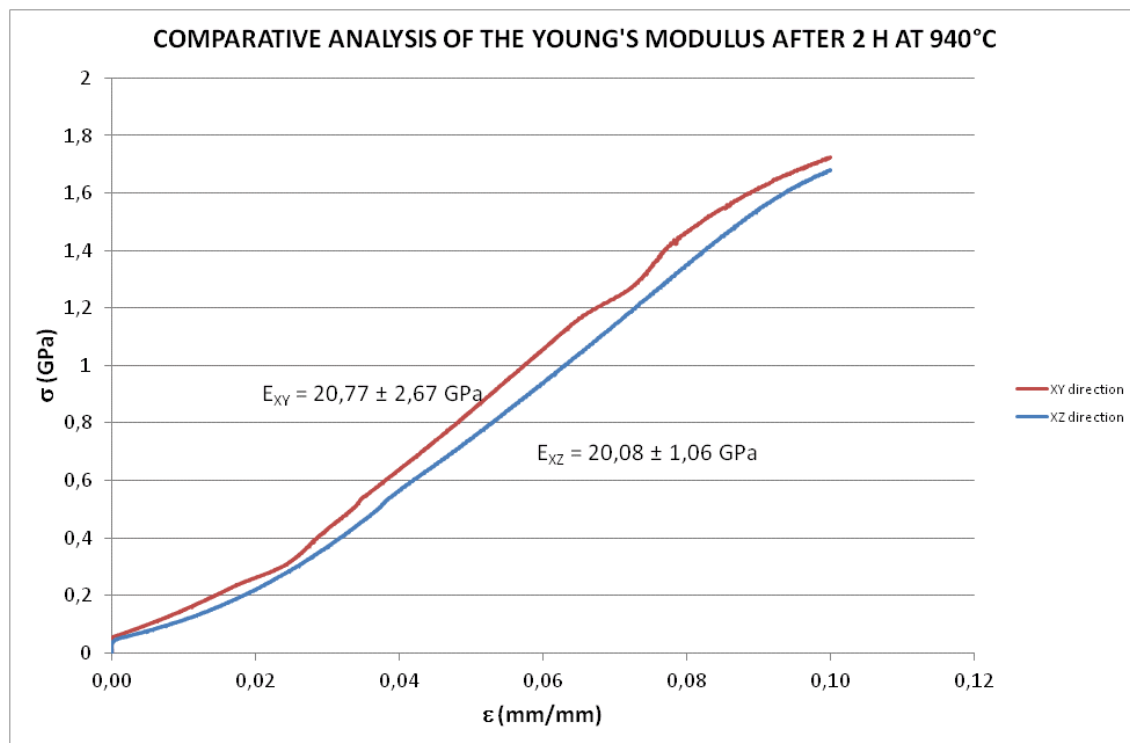


Figura nº 10. Diferencia de módulo elástico según dirección de fabricación.

Sin embargo, una vez rebasada la temperatura de transformación α , y sobre todo la temperatura de transformación β , la anisotropía, medida como módulo elástico en ambas

direcciones de fabricación tienden a reducirse. Cuanto mayor es la temperatura de tratamiento, menor es el valor del módulo elástico, tal como se puede observar en las gráficas siguientes.



Respecto a la dureza del material, los análisis realizados no son concluyentes, puesto que no se aprecia una variación significativa en el valor de dureza. Por lo que podrá ser objeto de posteriores estudios.

Tarea 3.3: Caracterización térmica.

La caracterización térmica se basó en la determinación de la temperatura de transición entre las distintas fases o microconstituyentes de la aleación de titanio para determinar la temperatura exacta donde se produce el cambio de fase.

Para ello se usó el equipo de dilatómetría, que es un equipo que se basa en la medición de los cambios geométricos debidos a dilataciones y contracciones en diversos rangos de temperatura

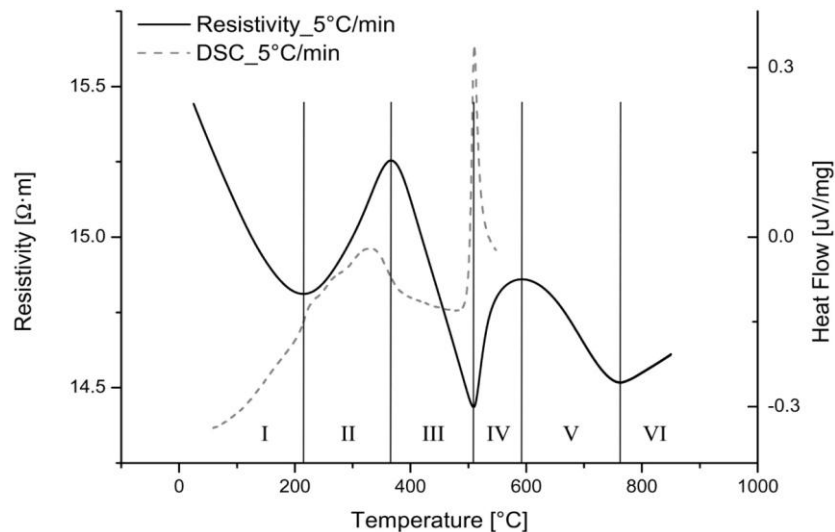
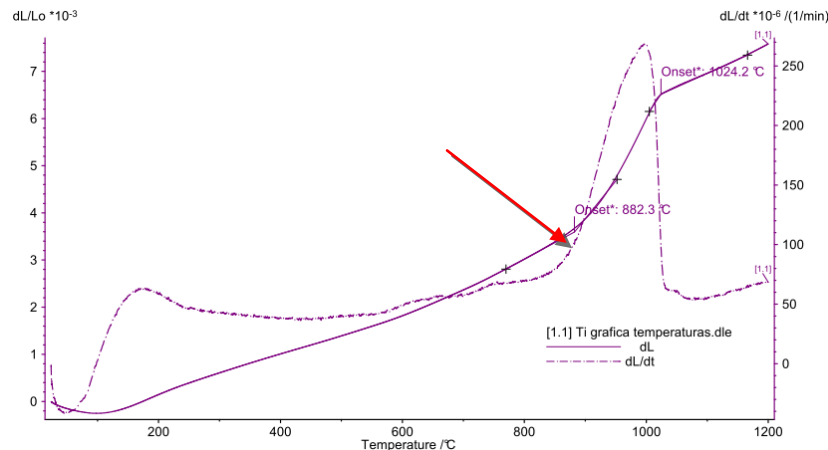


Imagen de las transformaciones que ocurren con respecto a la temperatura medidas a través de DSC. Lecture Josef Stráský

En la primera fase el fenómeno que ocurre es un proceso de disolución de la fase ω , un proceso considerado reversible sin existencia de difusión. Durante la segunda fase se estabiliza y existe un crecimiento de los microconstituyentes existentes, para posteriormente pasar a la disolución de la fase ω (fase 3), y una precipitación de la fase α (fase 4), hasta su disolución (fase 5). En el último cambio de pendiente ya tenemos toda la fase β transformada, y es este punto el crítico determinado para los posteriores tratamientos térmicos.

En nuestros estudios dilatométricos podemos encontrarnos equivalencias a las medidas de DSC, no pudiendo detectar la transformación del microconstituyente ω , pero sí los cambios producidos en la β transus, como puede apreciarse alrededor de los 880°C.



Mediciones de dilatómetro de las aleaciones de titanio producidas mediante haz de electrones.

4. Aplicaciones

La principal aplicación de los tratamientos térmicos sobre piezas obtenidas por fabricación aditiva es la mejora del comportamiento mecánico frente a esfuerzos. Es mejora, se obtiene como consecuencia de la reducción de la anisotropía de las piezas causada por el método de fabricación.

Con estos tratamientos, se pueden equiparar, en propiedades mecánicas, las piezas obtenidas por fabricación aditiva (EBM) con las propiedades mecánicas de piezas de Ti6Al4V obtenidas por métodos convencionales de fundición y colada/inyección.

La principal ventaja de las piezas obtenidas por fabricación aditiva es la falta de moldes, reduciendo costes indirectos y tiempo en la fabricación de piezas.

Además, estas piezas se pueden diseñar personalizadas, en cortas tiradas o incluso individuales, para lo que la industria convencional no está preparada por los elevados costes de fabricación que ello conlleva.

Los principales sectores beneficiarios de esta tecnología, son los sectores estratégicos aeroespacial y biomédico, ya que ofrece reducción de tiempos y costes de fabricación. Eliminación de utillajes y reducción de procesos auxiliares (como la soldadura).

En el sector biomédico, las prótesis quirúrgicas y dentales podrían fabricarse de manera personalizada, garantizando las propiedades mecánicas exigidas por el sector, y añadiendo la precisión que sólo las técnicas de fabricación aditiva pueden ofrecer.

Tubos de Pitot, bisagras, canales de refrigeración y otros componentes pueden aligerarse y mantener sus propiedades mecánicas en el sector aéreo y aeroespacial, reduciendo también costes de fabricación, tiempos de espera y necesidades de stock, entre otros.

5. Resumen. Conclusiones

- Los tratamientos térmicos por debajo de la temperatura de inicio de transformación alotrópica no generan cambios estructurales suficientes para modificar el comportamiento mecánico del material.
- Los tratamientos térmicos por encima de la temperatura de inicio de transformación alotrópica generan pocos cambios respecto al aspecto de la microestructura, aunque genera una considerable reducción de la anisotropía del material.
- Los tratamientos térmicos por encima de la temperatura de finalización de transformación alotrópica genera grandes cambios en el aspecto de la microestructura, así como una reducción drástica de la anisotropía.

6. Anexos

RESUMEN DE RESULTADOS DE MEDICIONES METALOGRAFICAS:

Description: SAMPLE 1. TITANIUM HEAT-TREATED SAMPLE AT 850°C.
SAMPLE 2. TITANIUM HEAT-TREATED SAMPLE AT 940°C.
SAMPLE 3. TITANIUM HEAT-TREATED SAMPLE AT 1200°C.

TESTS ON BULK SAMPLES

- MICROSTRUCTURE ANALYSIS

Date test: 5/10/2016 – 14/11/2016
Test equipment: Nikon LV100
Sample preparation: Material was embedded in standard epoxy resin and then mechanically grinded and finally polished with 4000 grit and 1µm diamond spray.
Etching reagent: Kroll
Testing conditions: Temperature: 22°
HR: 40%

Results:

BULK MATERIAL – EBM sample heat-treated at 850°C- Furnace cooled to 500°C and then air cooled. –
Sample 01 (XY plane)

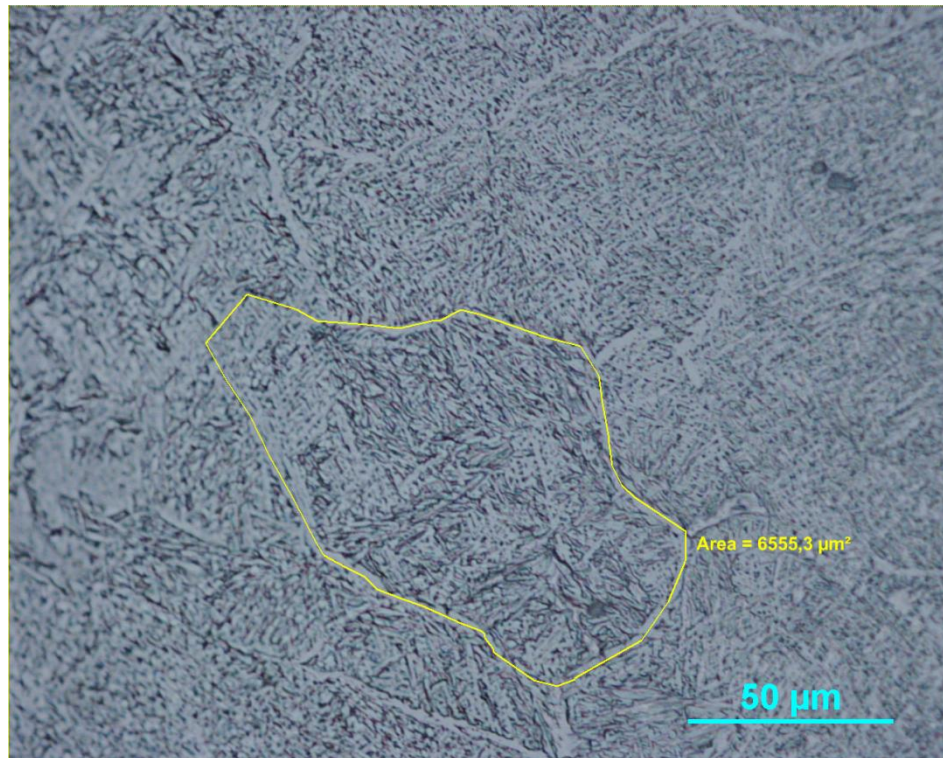


Figure nº 1. Build direction (XY plane). Grain size at 500x of sample 1.

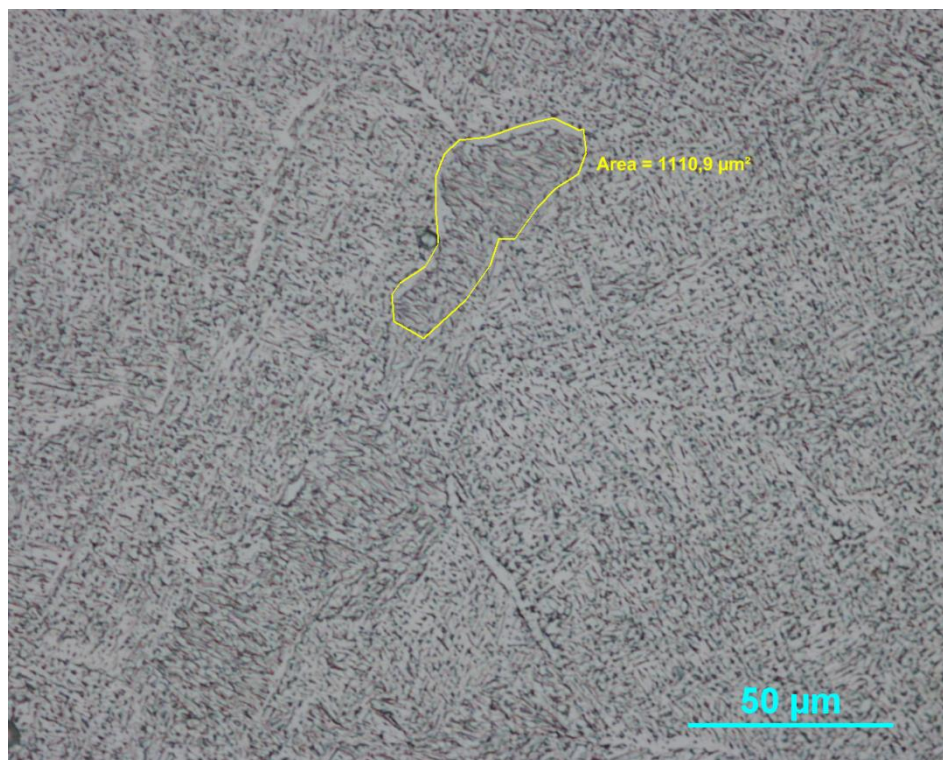


Figure nº 2. Build direction (XY plane). Alpha colonies at 500x of sample 1.

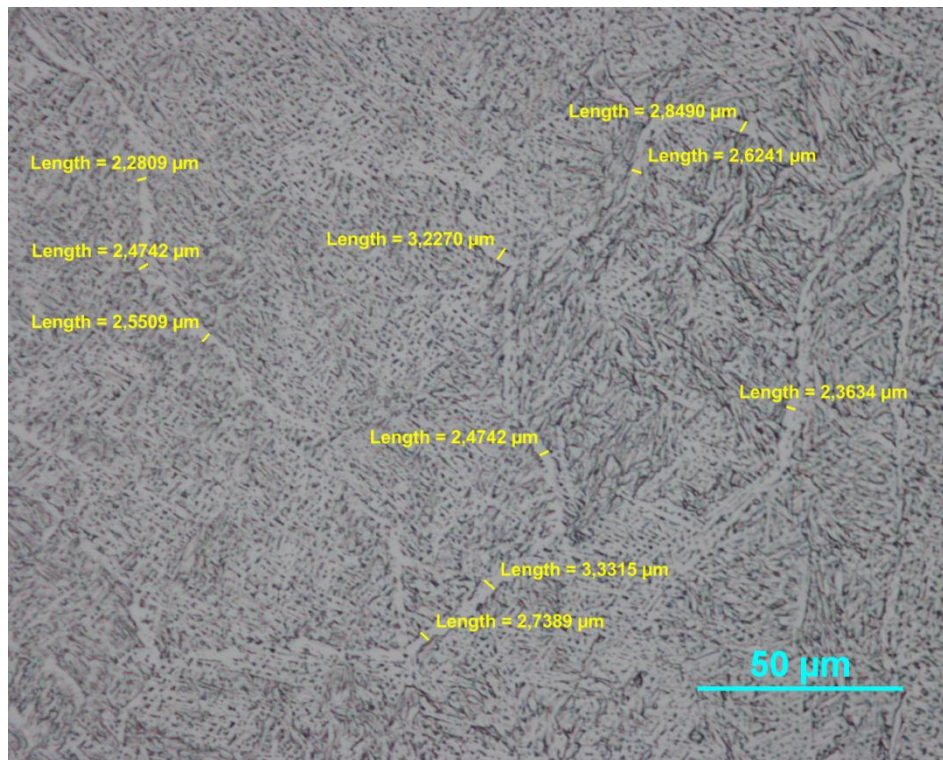


Figure nº 3. Build direction (XY plane). Boundary alpha phase at 500 x of sample 1.

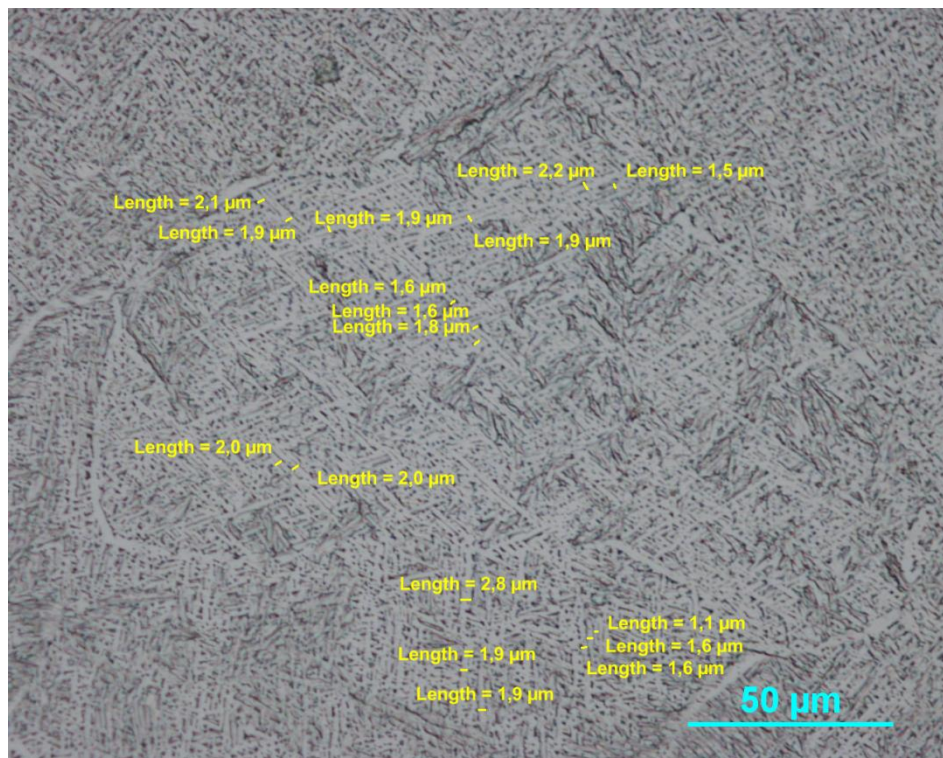


Figure nº 4. Build direction (XY plane). Alpha plates at 500 x of sample 1.

GRAIN SIZE	Area (μm^2)	Eq diameter of columnar grains (μm)	Grain size (ASTM E112)
------------	--------------------------	--	---------------------------

Result 1	2.226,51	53,24	
Result 2	6.662,93	92,11	
Result 3	3.357,28	65,38	
Result 4	15.934,38	142,44	
Average	7.045,28	88,29	
Standard desviation	5.384,80	34,28	

ALPHA COLONIES	Area (μm^2)	Eq diameter of columnar grains (μm)
Result 1	893,5	33,7
Result 2	1.276,8	40,3
Result 3	1.110,9	37,6
Result 4	766,4	31,2
Average	1.011,9	35,7
Standard desviation	196,4	4,04

ALPHA PHASE	THICKNESS OF GRAIN BOUNDARY ALPHA PHASE (µm)		
Results 1 to 25	2,2938	3,1267	2,002
	2,0174	2,5025	1,9026
	2,8105	3,0889	1,978
	2,849	2,6241	3,227
	2,4742	3,3315	2,7389
	2,2809	2,4742	2,5509
	2,3634	1,6605	3,7224
	3,3306	2,5507	2,4742
	2,4742		
Average	2,547		
Standard desviation	0,458		

ALPHA PLATES	THICKNESS OF ALPHA PLATES (µm)		
Results 1 to 44	2	2,8	1,5
	1,6	1,6	1,5
	1,8	1,6	1,8
	1,6	1,8	1,6
	1,6	2	2,2
	1,8	1,5	2
	1,6	2,2	2,1
	1,8	1,9	2,2
	2	1,9	1,8
	2	2,1	1,8
	1,6	1,9	2
	2,5	2	1,4
	2,2	1,6	1,5
	1,9	1,6	1,6
	1,9	1,1	
Average	1,81		
Standard deviation	0,23		

BULK MATERIAL – EBM sample heat-treated at 850°C- Furnace cooled to 500°C and then air cooled. –
Sample 01 (XZ plane)

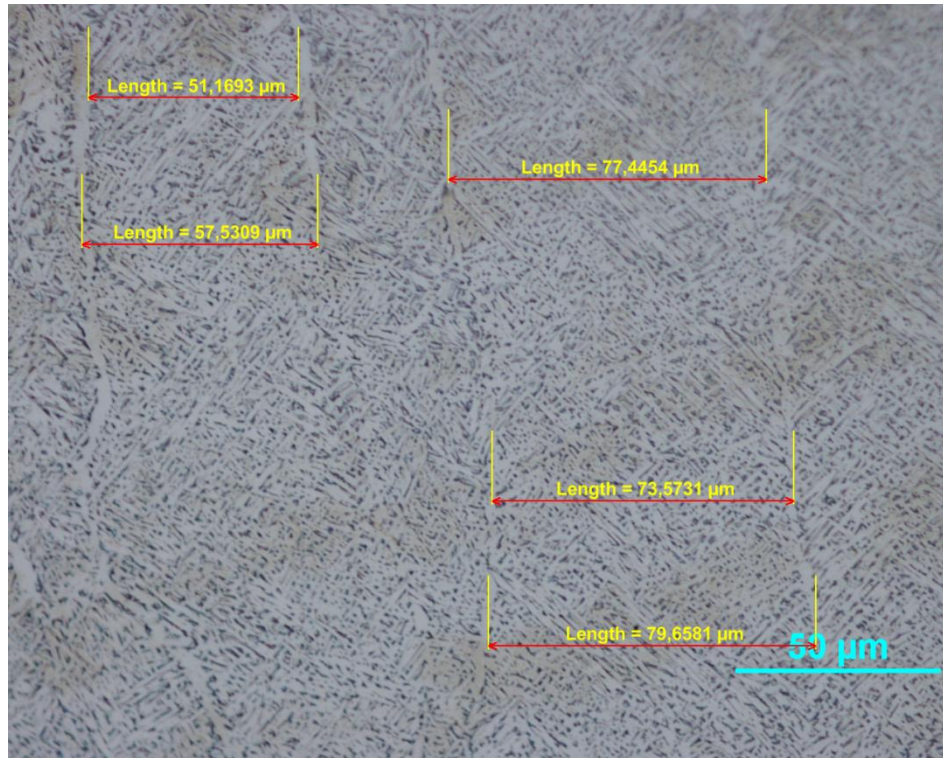


Figure nº 5. Build direction (XZ plane). Grain size at 500x of sample 1.

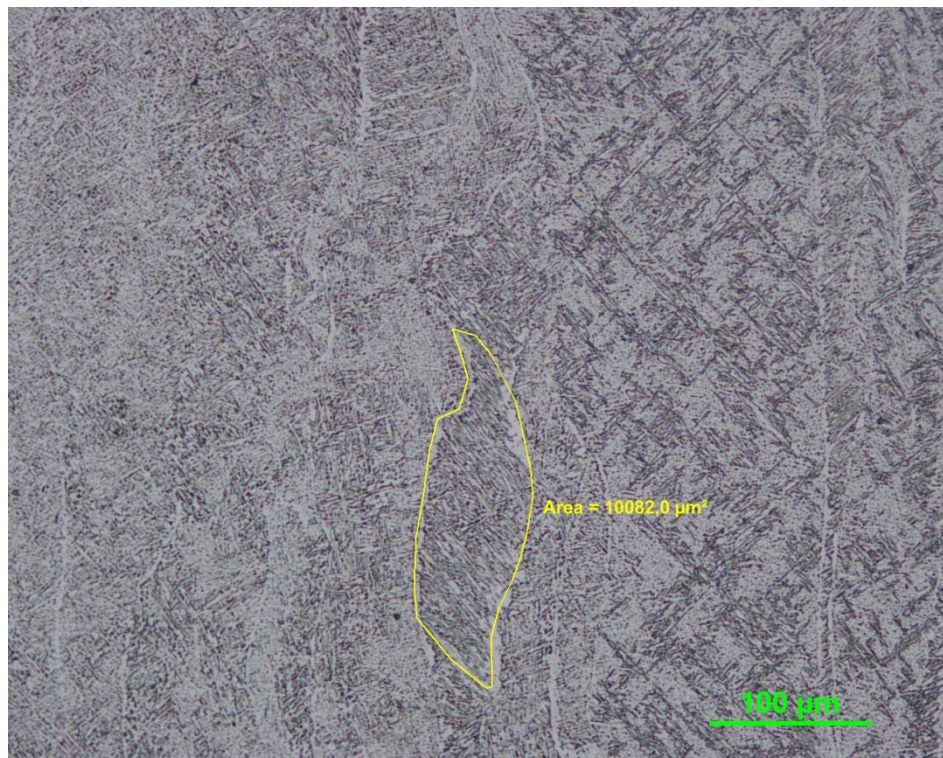


Figure nº 6. Build direction (XZ plane). Alpha colonies at 200x of sample 1.

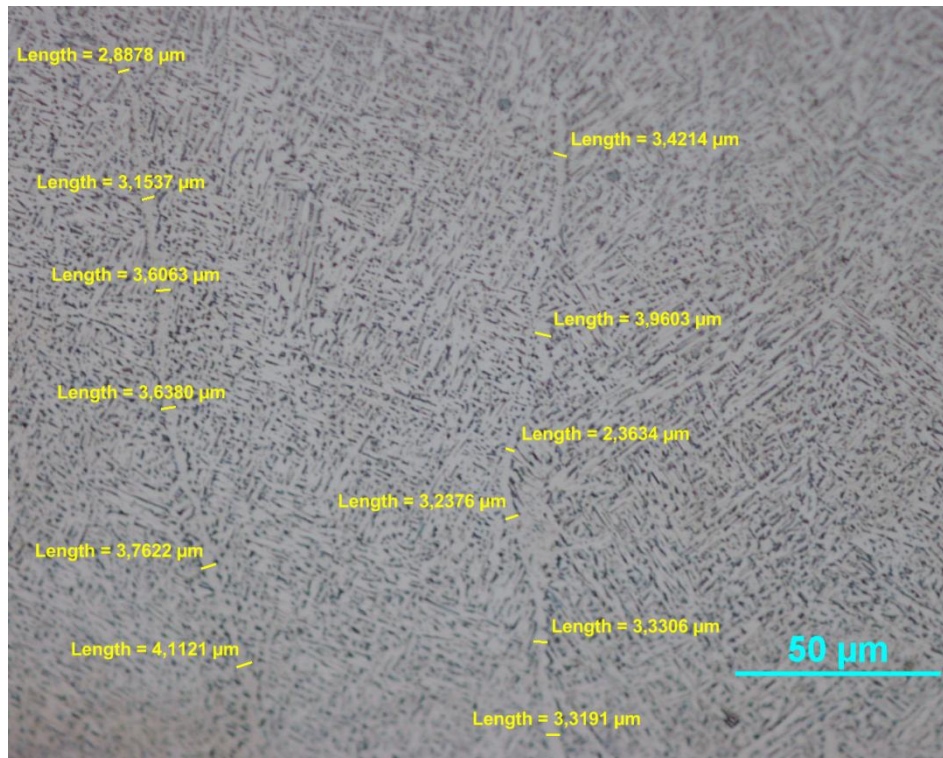


Figure nº 7. Build direction (XZ plane). Boundary alpha phase at 500 x of sample 1.

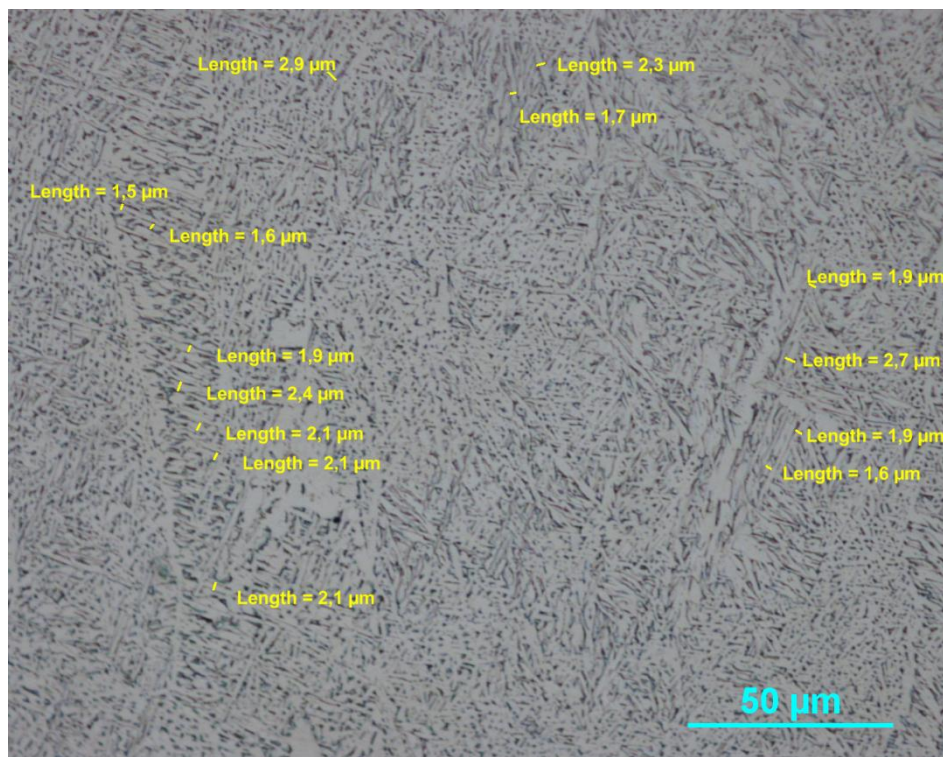


Figure nº 8. Build direction (XZ plane). Alpha plates at 500 x of sample 1.

GRAIN SIZE	Eq diameter of columnar grains (μm)	Grain size (ASTM E112)
Result 1	51,1693	
Result 2	57,5309	
Result 3	73,5731	
Result 4	79,6581	
Result 5	77,4454	
Result 6	62,2329	
Result 7	63,6158	
Result 8	63,6158	
Result 9	46,7438	
Result 10	46,7438	
Result 11	27,1059	
Result 12	35,9568	
Result 13	46,4672	
Result 14	46,4672	
Result 15	69,7008	
Result 16	47,0204	
Result 17	77,1688	
Result 18	35,9568	
Result 19	144,3803	
Result 20	130,8274	
Result 21	113,6788	
Average	59,04	
Standard desviation	20,23	

ALPHA COLONIES	Area (μm^2)	Eq diameter of columnar grains (μm)
Result 1	10.082,0	113,3
Result 2	10.911,1	117,9
Result 3	1.961,5	50,0
Result 4	6.635,5	91,4
Average	7.397,5	93,3
Standard desviation	3.524,3	17,1

ALPHA PHASE	THICKNESS OF GRAIN BOUNDARY ALPHA PHASE (μm)		
Results 1 to 48	3,8821	2,7244	3,9603
	3,5957	3,1537	3,4214
	2,5047	3,3191	2,3634
	3,4988	3,3649	3,2376
	3,0425	2,6241	2,5501
	2,1066	2,9412	2,5501
	4,3735	2,8878	2,3634
	3,6063	3,1537	2,6241
	3,3649	3,6063	2,5047
	4,702	3,638	1,9558
	3,6903	3,7622	2,23
	3,3424	4,1121	3,0425
	3,3424	3,3191	2,5047
	2,8481	3,3306	2,5501
Average	3,097		
Standard deviation	0,578		

ALPHA PLATES	THICKNESS OF ALPHA PLATES (μm)		
Results 1 to 44	2	2,8	1,5
	2,1	1,6	2,3
	1,8	1,9	2,2
	2,2	2,4	1,6
	1,8	2,1	1,8
	2,2	2,1	1,8
	2,1	2,1	1,5
	2,1	2,3	1,6
	1,9	1,7	2,2
	1,5	2,9	1,6
	2	2,3	2,4
	2,6	2,2	2,7
	1,9	2	1,8
	1,6	1,6	2,6
	2,7	2	2,4
	1,9	2	2,6
	1,5	2,1	1,5
Average	2,02		
Standard deviation	0,34		

Sample 01	XY PLANE	XZ PLANE	ANISOTROPY
GRAIN SIZE (Eq. Diameter - μm)	88,29	66,53	24,65%
ALPHA COLONIES (Eq. Diameter - μm)	35,7	93,3	61,74 %
THICKNESS OF GRAIN BOUNDARY ALPHA PHASE (μm)	2,547	3,136	18,78 %
THICKNESS OF ALPHA PLATES	1,81	2,02	10,40 %

(μm)			
------	--	--	--

BULK MATERIAL – EBM sample heat-treated at 940°C- Furnace cooled to 500°C and then air cooled. –
Sample 02 (XY plane)

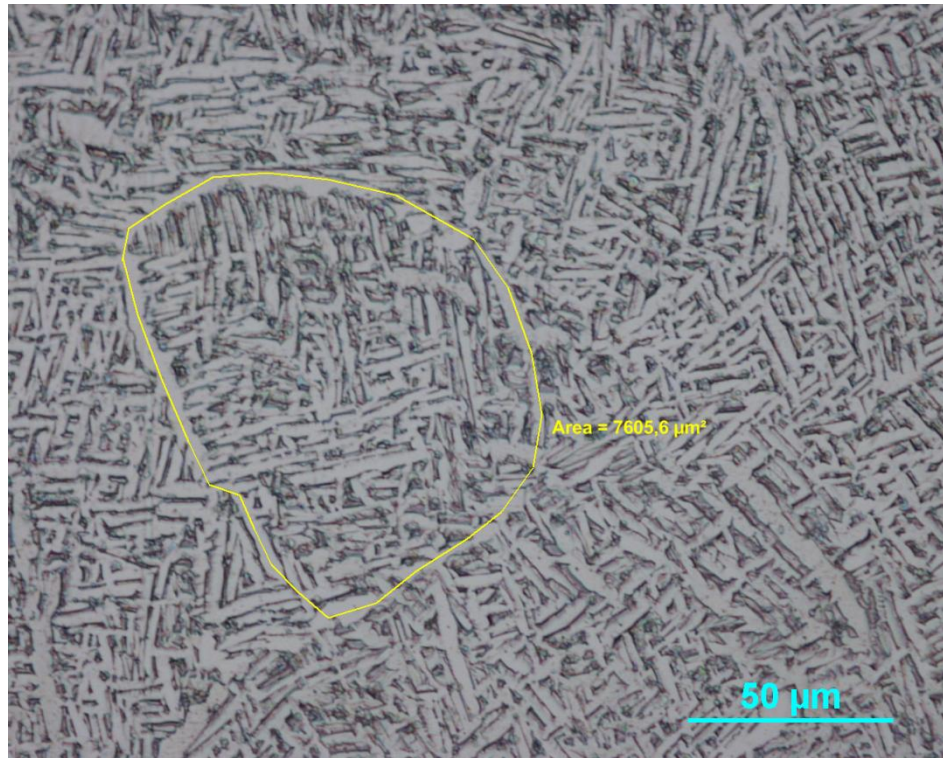


Figure nº 9. Build direction (XY plane). Grain size at 500x of sample 2.

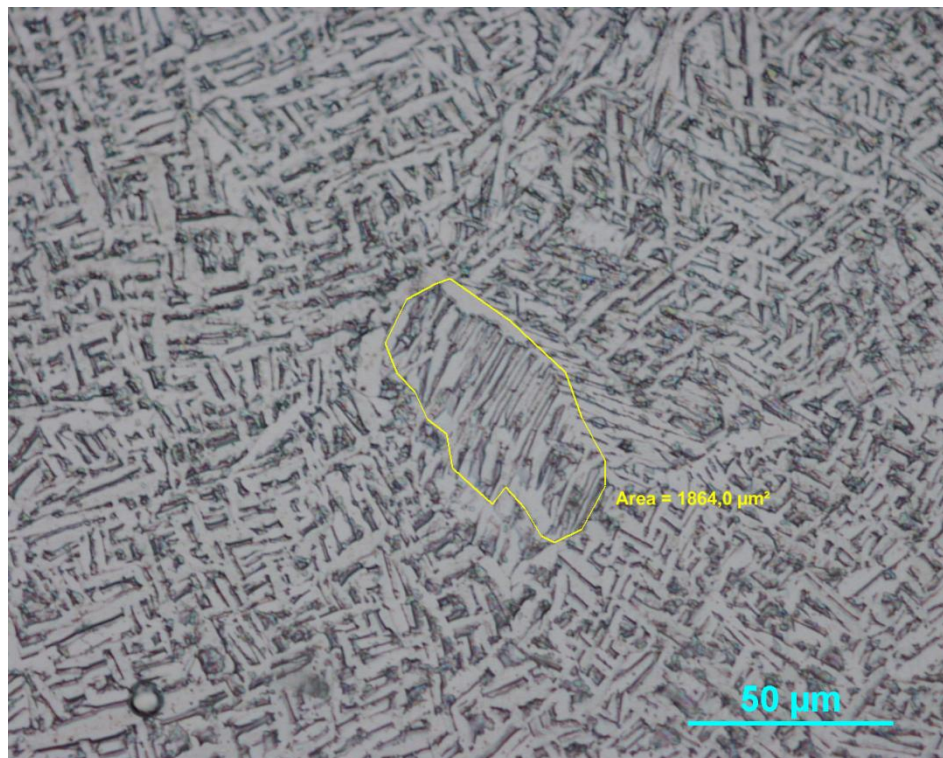


Figure nº 10. Build direction (XY plane). Alpha colonies at 500x of sample 2.

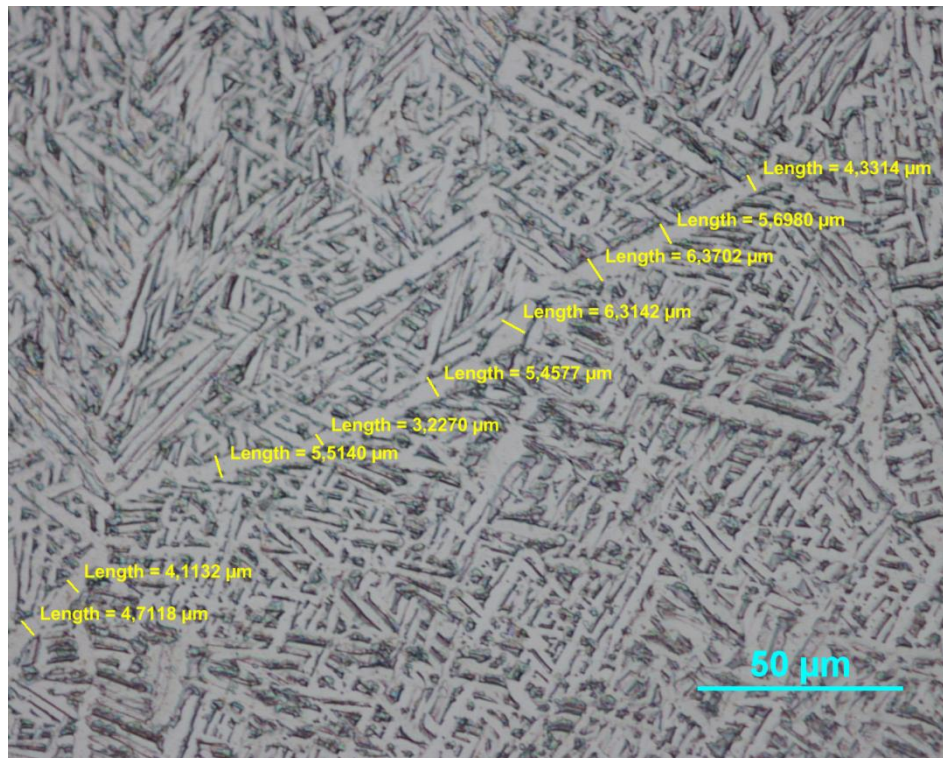


Figure nº 11. Build direction (XY plane). Boundary alpha phase at 500 x of sample 2.



Figure nº 12. Build direction (XY plane). Alpha plates at 500 x of sample 2.

GRAIN SIZE	Area (μm^2)	Eq diameter of columnar grains (μm)	Grain size (ASTM E112)
Result 1	18.369,8	152,9	
Result 2	9.217,9	108,3	
Result 3	5.897,0	86,7	
Result 4	7.605,6	98,4	
Average	10.272,6	111,6	
Standard desviation	4.820,2	28,9	

ALPHA COLONIES	Area (μm^2)	Eq diameter of columnar grains (μm)
Result 1	1.376,0	41,9
Result 2	1.135,0	38,0
Result 3	1.864,0	48,7
Result 4	706,5	30,0
Result 5	1.073,7	37,0
Average	1.231,0	39,1
Standard desviation	383,3	6,86

ALPHA PHASE	THICKNESS OF GRAIN BOUNDARY ALPHA PHASE (μm)		
Results 1 to 23	4,3314	4,7118	3,3437
	5,698	5,221	5,698
	6,3702	5,321	4,702
	6,3142	5,0798	3,9128
	5,4577	4,3314	5,0877
	3,227	3,2261	5,1674
	5,514	4,3756	4,7118
	4,1132	4,639	
Average	4,807		
Standard desviation	0,881		

ALPHA PLATES	THICKNESS OF ALPHA PLATES (μm)		
Results 1 to 39	2,2	3,5	2,6
	3,3	3,3	3,2
	3,5	3,6	3,2
	3,6	2,9	3,7
	3,0	3	3,7
	3,7	2,1	3,6
	3,0	2,9	2,8
	2,9	3,2	2,8
	3,0	2,4	3,7
	2,8	2,7	3,8
	2,3	2,3	3,4
	2,8	2,2	2,8
	2,8	2,8	3,2
Average	3,0		

ALPHA PLATES	THICKNESS OF ALPHA PLATES (μm)
Standard deviation	0,48

BULK MATERIAL – EBM sample heat-treated at 940°C- Furnace cooled to 500°C and then air cooled. –
Sample 02 (XZ plane)

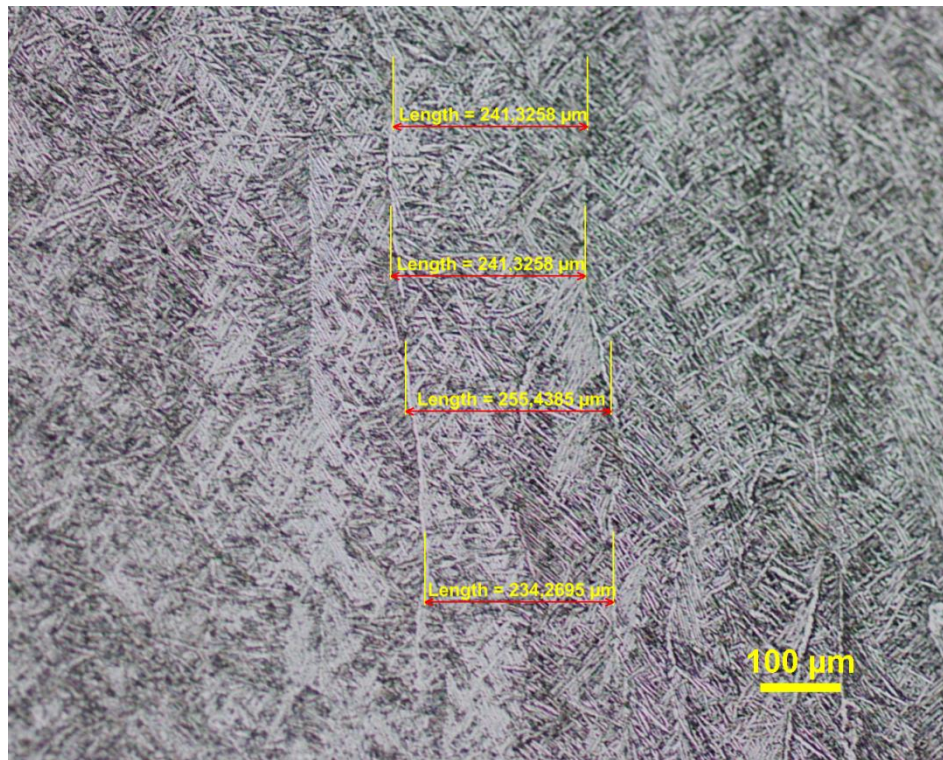


Figure nº 13. Build direction (XZ plane). Grain size at 100x of sample 2.

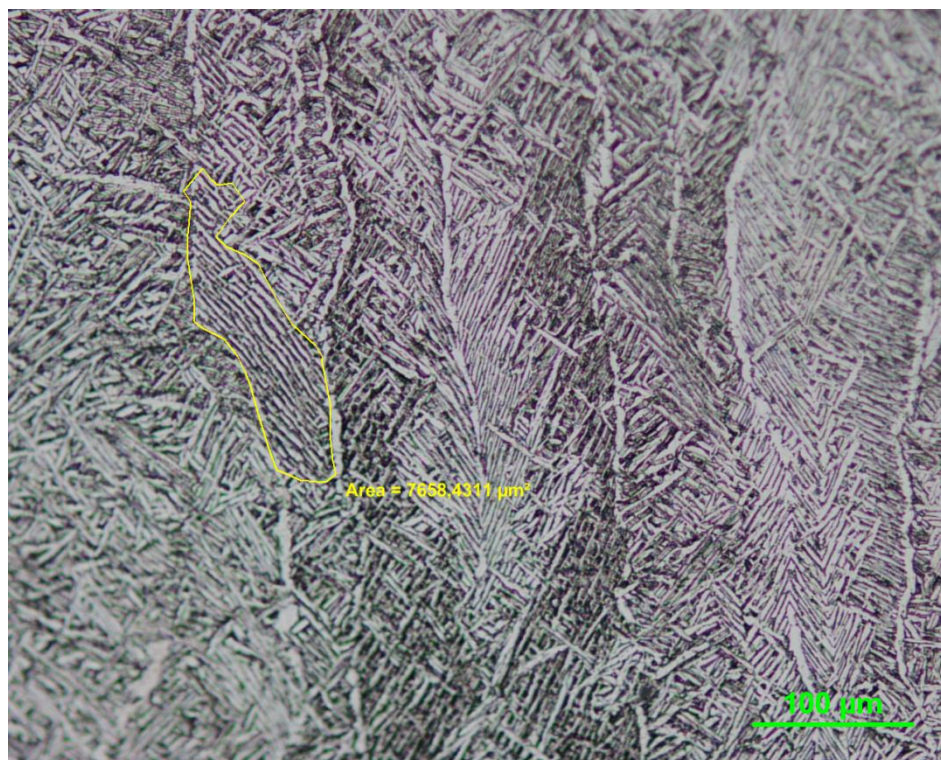


Figure nº 14. Build direction (XZ plane). Alpha colonies at 200x of sample 2.

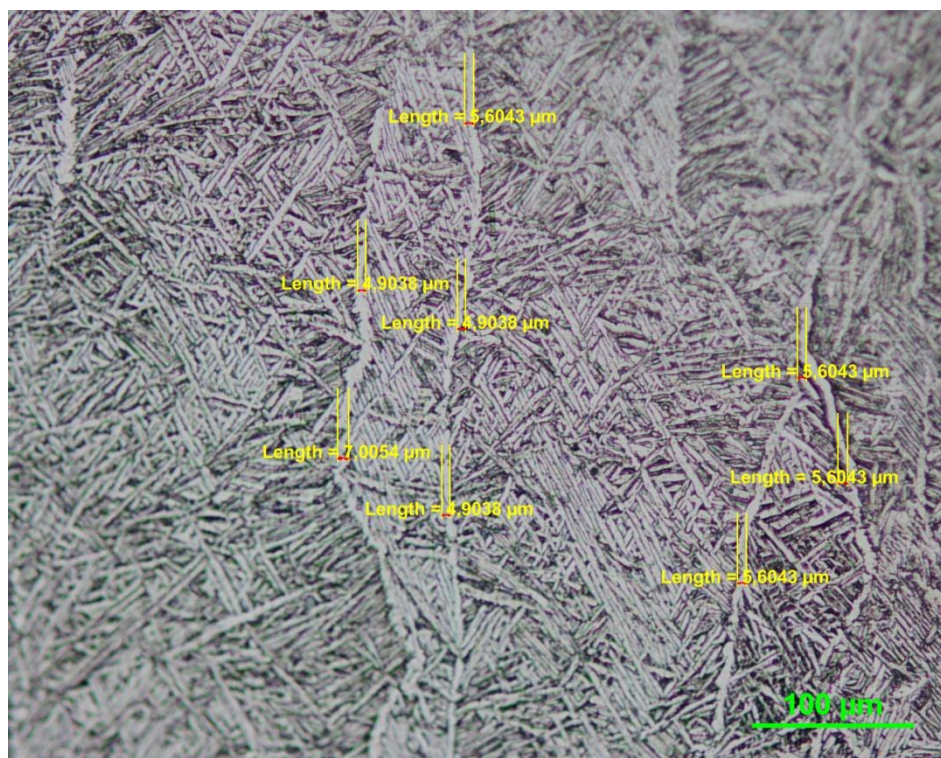


Figure nº 15. Build direction (XZ plane). Boundary alpha phase at 200 x of sample 2.



Figure nº 16. Build direction (XZ plane). Alpha plates at 500 x of sample 2.

GRAIN SIZE	Eq diameter of columnar grains (μm)	Grain size (ASTM E112)
Result 1	265,3	
Result 2	228,6	
Result 3	237,1	
Result 4	221,6	
Result 5	218,7	
Result 6	153,8	
Result 7	153,8	
Result 8	173,6	
Result 9	131,2	
Result 10	241,3	
Result 11	241,3	
Result 12	255,4	
Result 13	234,3	
Result 14	179,2	
Result 15	211,7	
Result 16	149,6	
Result 17	204,6	
Average	206,0	
Standard desviation	41,20	

ALPHA COLONIES	Area (μm^2)	Eq diameter of columnar grains (μm)
Result 1	4.445,0	75,2
Result 2	8.874,8	106,3
Result 3	7.274,9	96,2
Result 4	7.658,4	98,7
Average	7.063,3	94,13
Standard desviation	1.623,0	13,31

ALPHA PHASE	THICKNESS OF GRAIN BOUNDRY ALPHA PHASE (μm)		
Results 1 to 16	5,6	4,9	4,9
	5,6	4,2	4,9
	6,3	5,6	5,6
	6,3	5,6	5,6
	4,9	4,9	5,6
	5,6		
Average	5,39		
Standard desviation	0,556		

ALPHA PLATES	THICKNESS OF ALPHA PLATES (μm)		
Results 1 to 26	2,6	4,0	3,3
	3,2	3,3	4,1
	3,6	2,8	4,1
	3,0	4,2	4,3
	2,4	3,7	3,2
	3,3	4,1	4,2
	2,8	2,8	3,8
	2,4	4,3	3,2
	3,3	3,6	
Average	3,46		
Standard deviation	0,600		

Sample 02	XY PLANE	XZ PLANE	ANISOTROPY
GRAIN SIZE (Eq. Diameter - μm)	111,68	206,0	45,79%
ALPHA COLONIES (Eq. Diameter - μm)	39,1	94,13	58,46%
THICKNESS OF GRAIN BOUNDARY ALPHA PHASE (μm)	4,81	5,39	10,76%
THICKNESS OF ALPHA PLATES (μm)	3,0	3,46	13,29%

BULK MATERIAL – EBM sample heat-treated at 1200°C- Furnace cooled to 500°C and then air cooled. –
Sample 03 (XY plane)

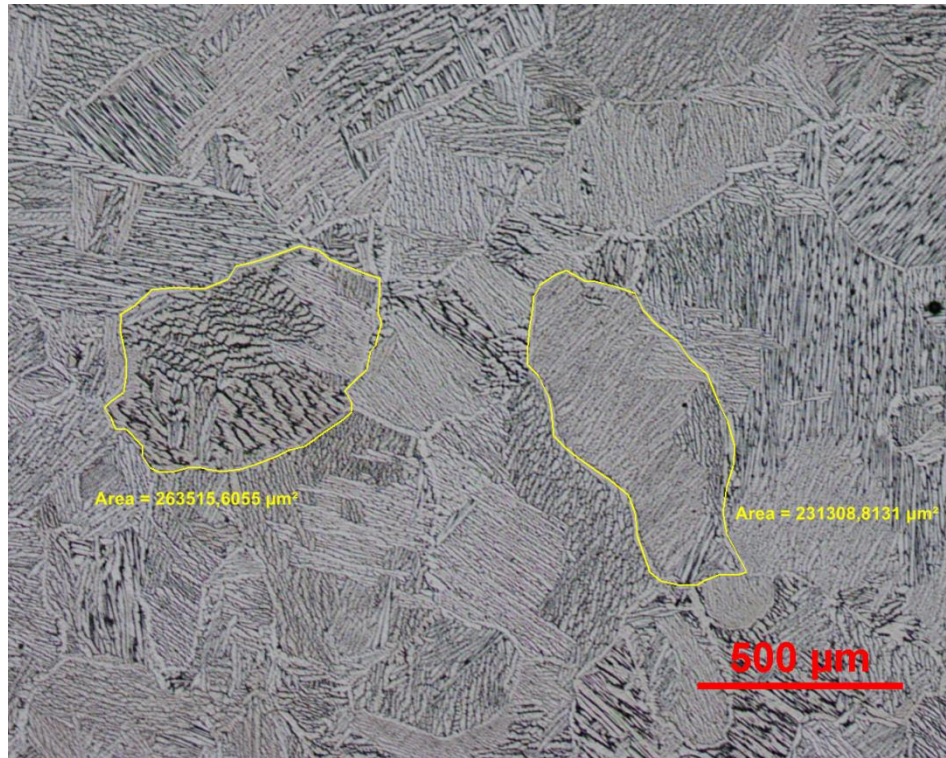


Figure nº 17. Build direction (XY plane). Grain size at 500x of sample 3.

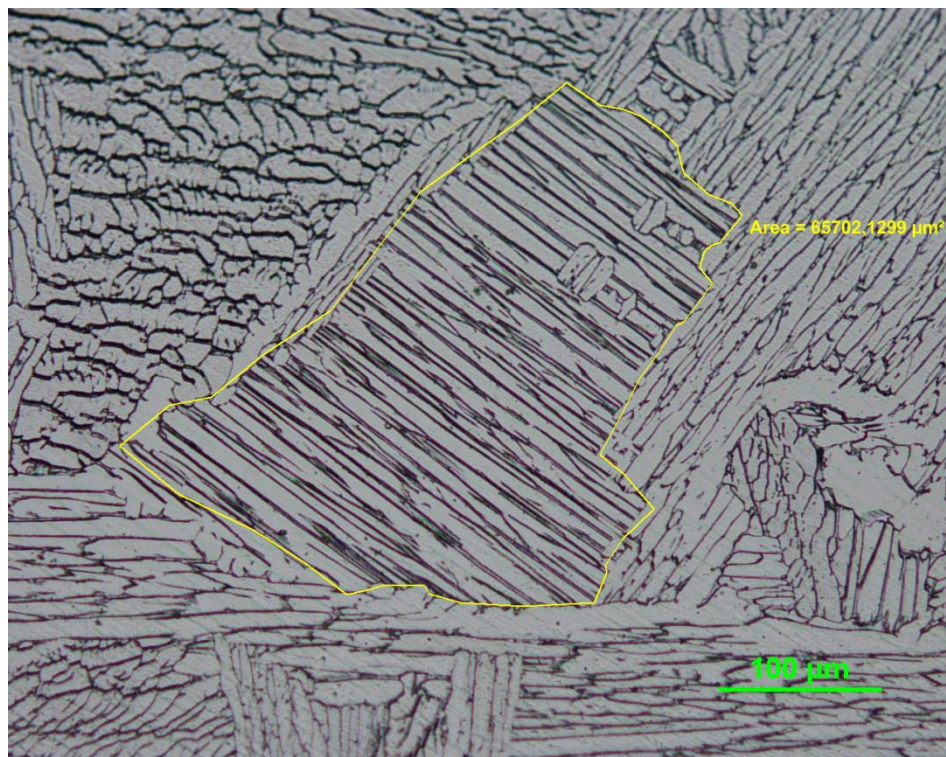


Figure nº 18. Build direction (XY plane). Alpha colonies at 500x of sample 3.

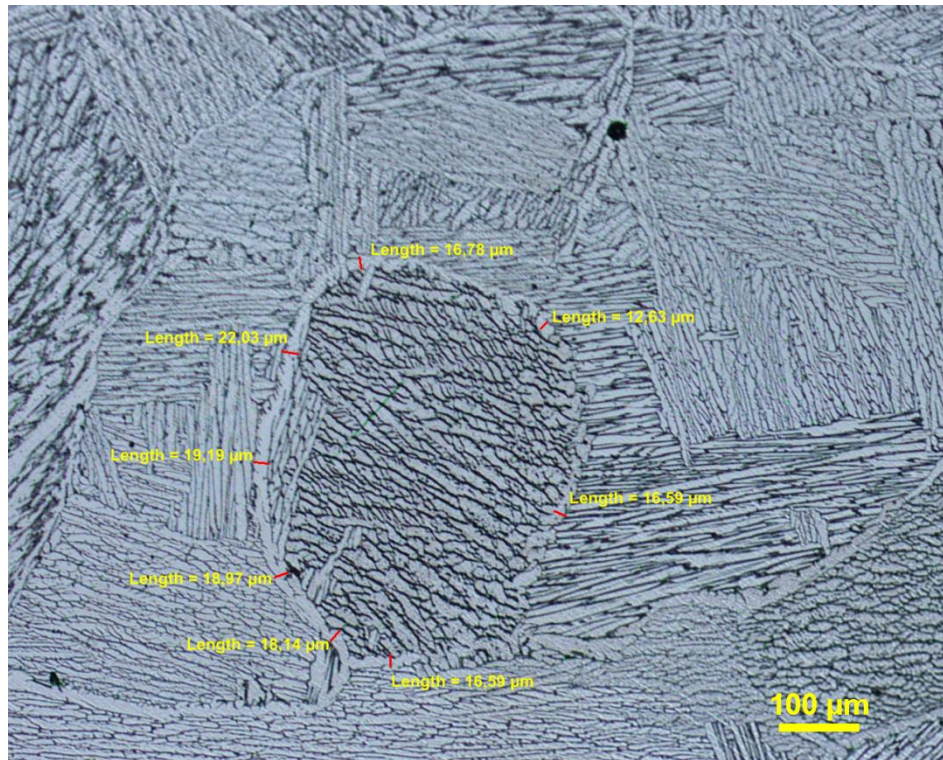


Figure nº 19. Build direction (XY plane). Boundary alpha phase at 500 x of sample 3.

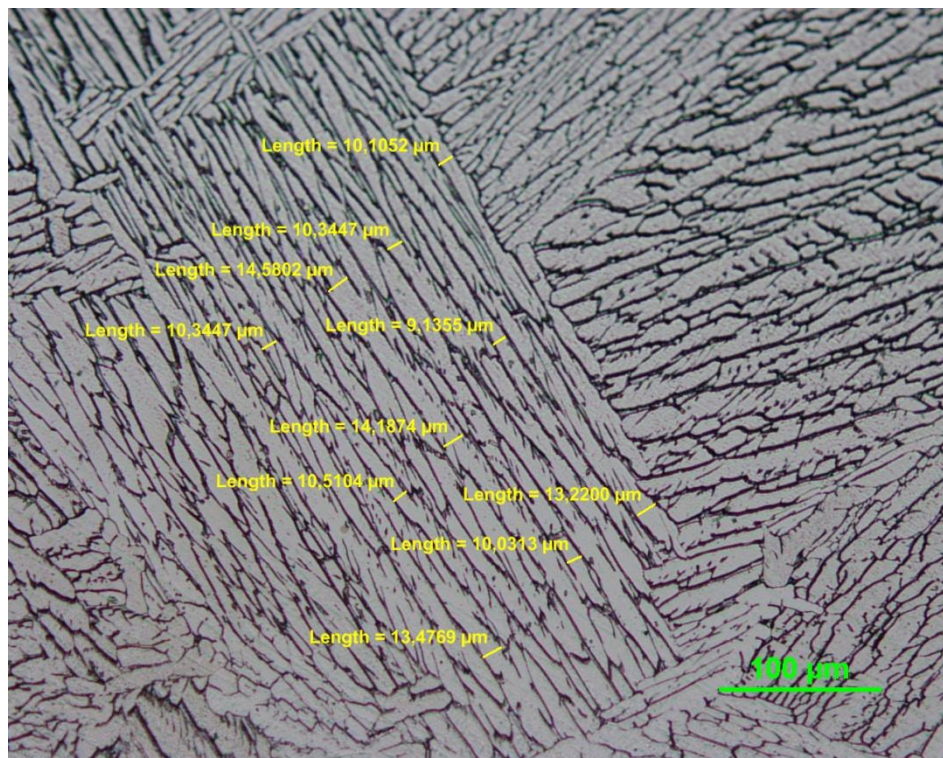


Figure nº 20. Build direction (XY plane). Alpha plates at 500 x of sample 3.

GRAIN SIZE	Area (μm^2)	Eq diameter of columnar grains (μm)	Grain size (ASTM E112)
Result 1	152.068,6	440,0	
Result 2	39.727,2	224,9	
Result 3	330.919,0	649,1	
Result 4	102.474,8	361,2	
Result 5	138.984,4	420,7	
Result 6	574.724,7	855,4	
Result 7	231.308,8	542,7	
Result 8	263.515,6	579,2	
Average	229.215,4	509,16	
Standard desviation	156.908,9	193,03	

ALPHA COLONIES	Area (μm^2)	Eq diameter of columnar grains (μm)
Result 1	37.994,1	219,9
Result 2	13.801,9	132,6
Result 3	38.315,5	220,9
Result 4	65.702,1	289,2
Average	38.953,4	215,65
Standard desviation	18.367,2	64,20

ALPHA PHASE	THICKNESS OF GRAIN BOUNDRY ALPHA PHASE (μm)		
Results 1 to 36	14,55	8,56	18,58
	14,44	16,78	14,27
	14,55	12,63	18,05
	12,76	16,59	9,02
	18,14	16,59	17,92
	8,17	18,14	18,97
	10,98	18,97	12,76
	11,42	19,19	15,99
	16,59	11,56	10,83
	13,14	12,83	12,57
	19,14	12,04	17,36
	7,66	14,27	11,41
Average	14,37		
Standard desviation	3,42		

ALPHA PLATES	THICKNESS OF ALPHA PLATES (μm)		
Results 1 to 45	10,97	6,61	12,69
	9,40	10,70	14,87
	11,60	8,78	11,41
	8,47	6,61	7,74
	9,11	11,30	9,84
	14,10	10,511	10,10
	9,53	10,95	9,14

ALPHA PLATES	THICKNESS OF ALPHA PLATES (μm)		
	11,91	8,17	14,58
	11,93	8,17	10,51
	14,02	8,17	14,19
	11,99	6,03	10,03
	9,73	15,39	13,48
	11,30	11,30	13,22
	8,47	10,61	10,34
	6,27	12,10	10,34
Average	10,59		
Standard deviation	2,35		

BULK MATERIAL – EBM sample heat-treated at 1200°C- Furnace cooled to 500°C and then air cooled. –
Sample 03 (XZ plane)



Figure nº 21. Build direction (XZ plane). Grain size at 100x of sample 3.

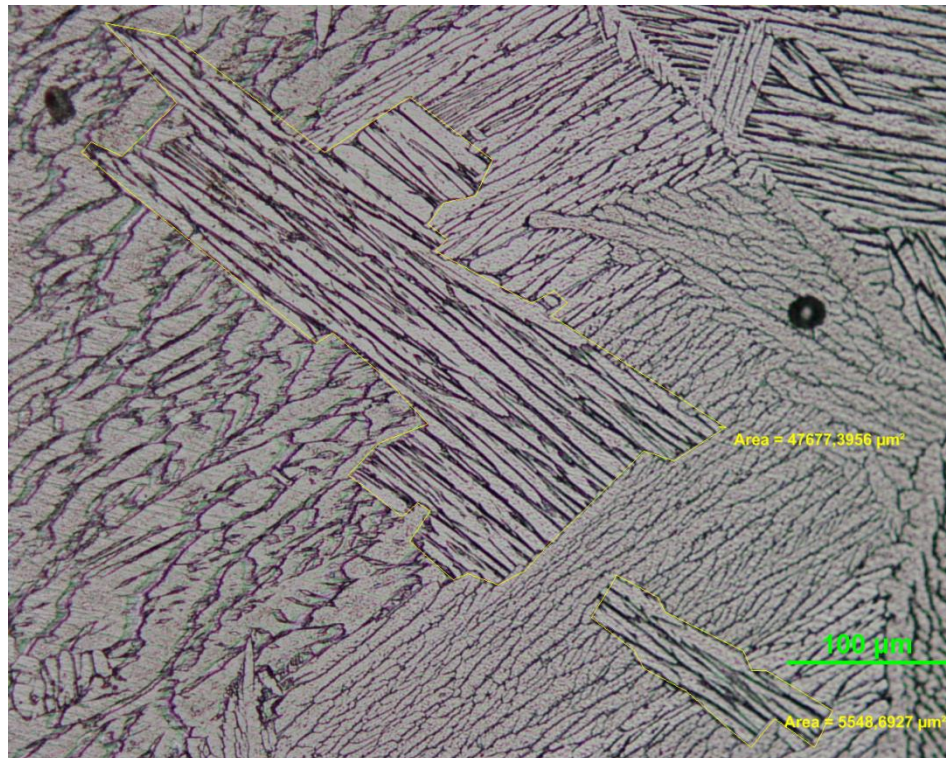


Figure nº 22. Build direction (XZ plane). Alpha colonies at 200x of sample 3.

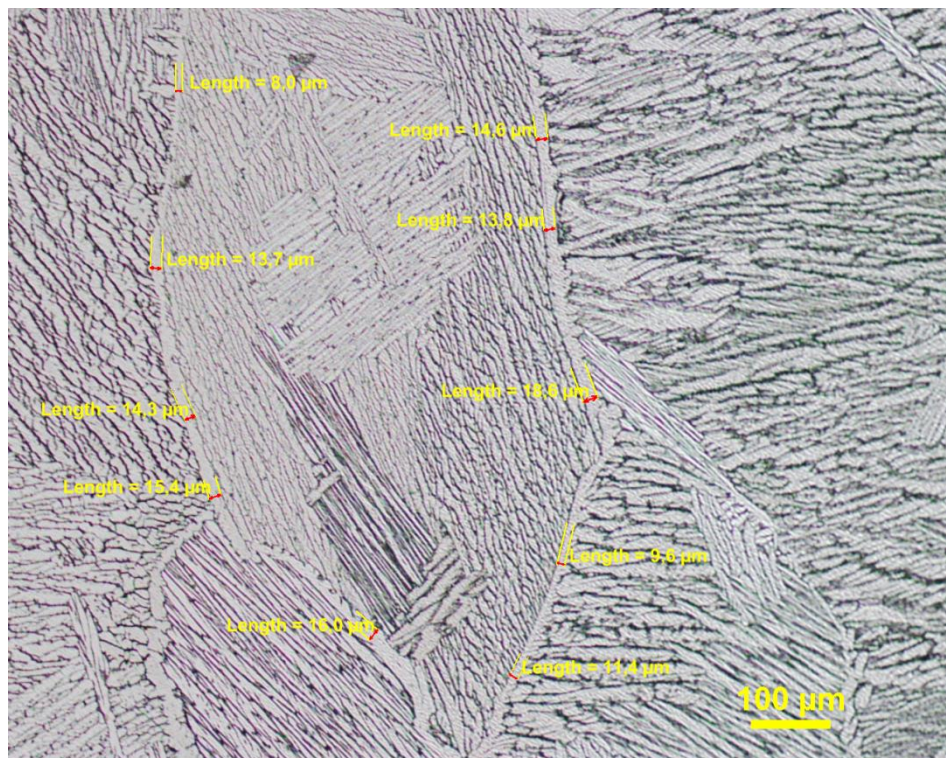


Figure nº 23. Build direction (XZ plane). Boundary alpha phase at 200 x of sample 3.

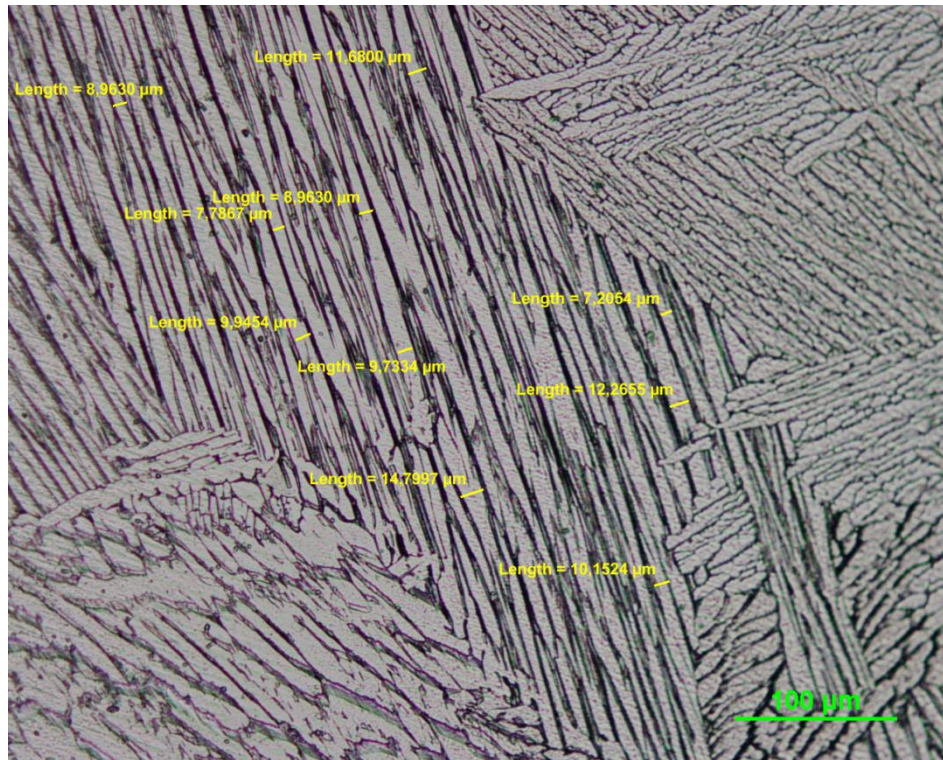


Figure nº 24. Build direction (XZ plane). Alpha plates at 500 x of sample 3.

GRAIN SIZE	Eq diameter of columnar grains (µm)	Grain size (ASTM E112)
Result 1	612,5	
Result 2	634,3	
Result 3	590,6	
Result 4	578,4	
Result 5	588,2	
Result 6	617,3	
Result 7	580,9	
Result 8	617,3	
Result 9	542,0	
Result 10	590,6	
Result 11	597,9	
Result 12	403,4	
Result 13	503,1	
Result 14	403,4	
Average	561,4	
Standard desviation	74,56	

ALPHA COLONIES	Area (μm^2)	Eq diameter of columnar grains (μm)
Result 1	35627,7	213,0
Result 2	50629,0	253,9
Result 3	94075,1	346,1
Result 4	47677,4	246,4
Result 5	5548,7	84,11
Average	46.711,68	228,68
Standard desviation	28.554,57	94,73

ALPHA PHASE	THICKNESS OF GRAIN BOUNDARY ALPHA PHASE (μm)		
Results 1 to 38	14,8	18,1	20,4
	15,2	18,8	14,7
	10,6	14	13,3
	13,7	12,4	14,6
	14,3	13,9	15,9
	15,4	17,1	18,4
	16	16,4	10,5
	11,4	17,8	15,5
	9,6	19,8	18,7
	18,6	17,7	11,4
	13,8	16,4	11,3
	14,6	19,8	
Average	15,28		
Standard desviation	2,89		

ALPHA PLATES	THICKNESS OF ALPHA PLATES (μm)		
Results 1 to 41	9,2	9,2	12,7
	6,1	7,0	11,5
	8,0	7,2	6,9
	8,4	12,3	5,8
	6,3	11,7	10,5
	6,2	7,8	7,2
	12,1	9,9	8,8
	8,9	9,0	7,0
	11,3	9,0	12,6
	12,6	9,7	8,4
	8,4	10,2	8,4
	5,0	10,8	10,0
	7,4	9,2	9,4
	5,3	6,6	
Average	8,87		
Standard deviation	2,14		

Sample 03	XY PLANE	XZ PLANE	ANISOTROPY
GRAIN SIZE (Eq. Diameter - μm)	509,16	561,4	9,31%
ALPHA COLONIES (Eq. Diameter - μm)	215,65	228,68	5,70%
THICKNESS OF GRAIN BOUNDARY ALPHA PHASE (μm)	14,37	15,28	5,96%
THICKNESS OF ALPHA PLATES (μm)	10,59	8,87	16,24%

ANYSOTROPY EVOLUTION	SAMPLE 1	SAMPLE 2	SAMPLE 3
GRAIN SIZE (Eq. Diameter - μm)	24,65%	45,79%	9,31%
ALPHA COLONIES (Eq. Diameter - μm)	61,74 %	58,46%	5,70%
THICKNESS OF GRAIN BOUNDARY ALPHA PHASE (μm)	18,78 %	10,76%	5,96%
THICKNESS OF ALPHA PLATES (μm)	10,40 %	13,29%	16,24%