



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

FEITO DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM TIG E LASER NA FORMAÇÃO DE FERRITA DELTA NO AÇO INOXIDÁVEL 304L

Jefferson Douglas Santos de Melo – RA: 11201721563

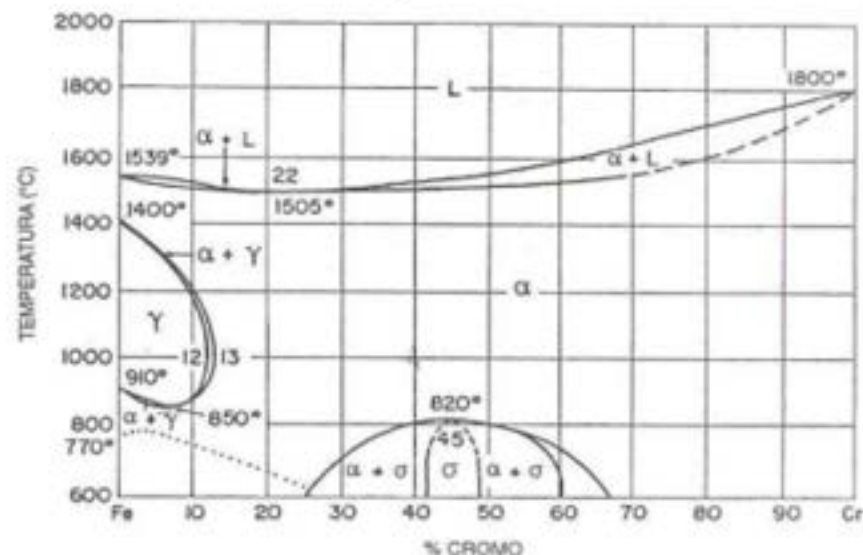
Prof. Dr. Mohammad Masoumi

Santo André - SP
2022

Type 304 Stainless Steel Chemical Composition,^[4] %

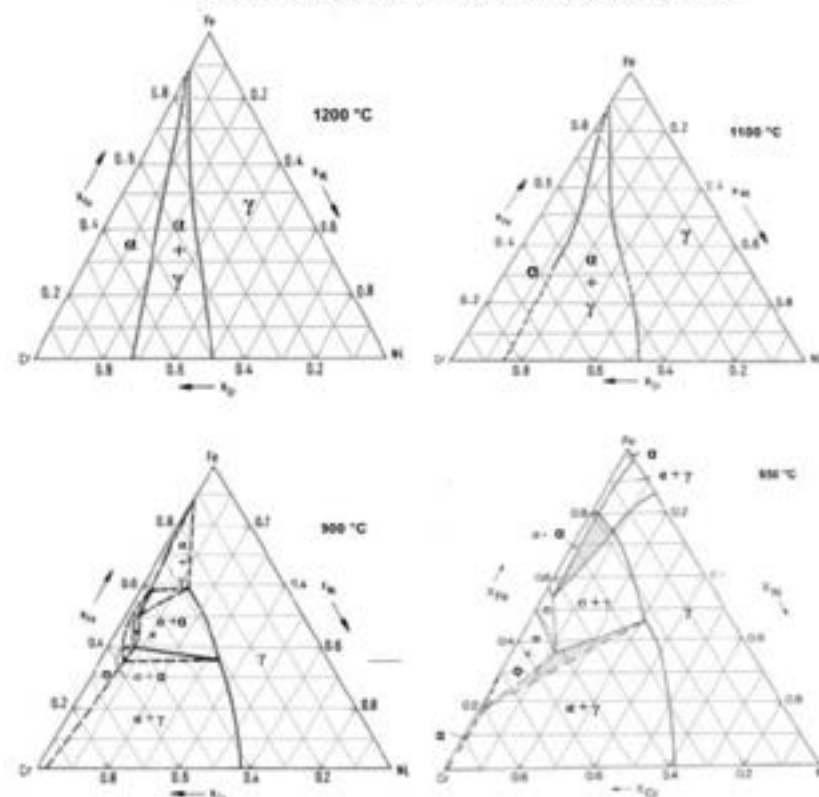
Standard	AISI (UNS)	C, ≤	Si, ≤	Mn, ≤	P, ≤	S, ≤	Cr	Ni
ASTM A276/A276M	304 (S30400)	0.08	1.00	2.00	0.045	0.030	18.0-20.0	8.0-11.0

Diagrama de fases Fe-Cr.



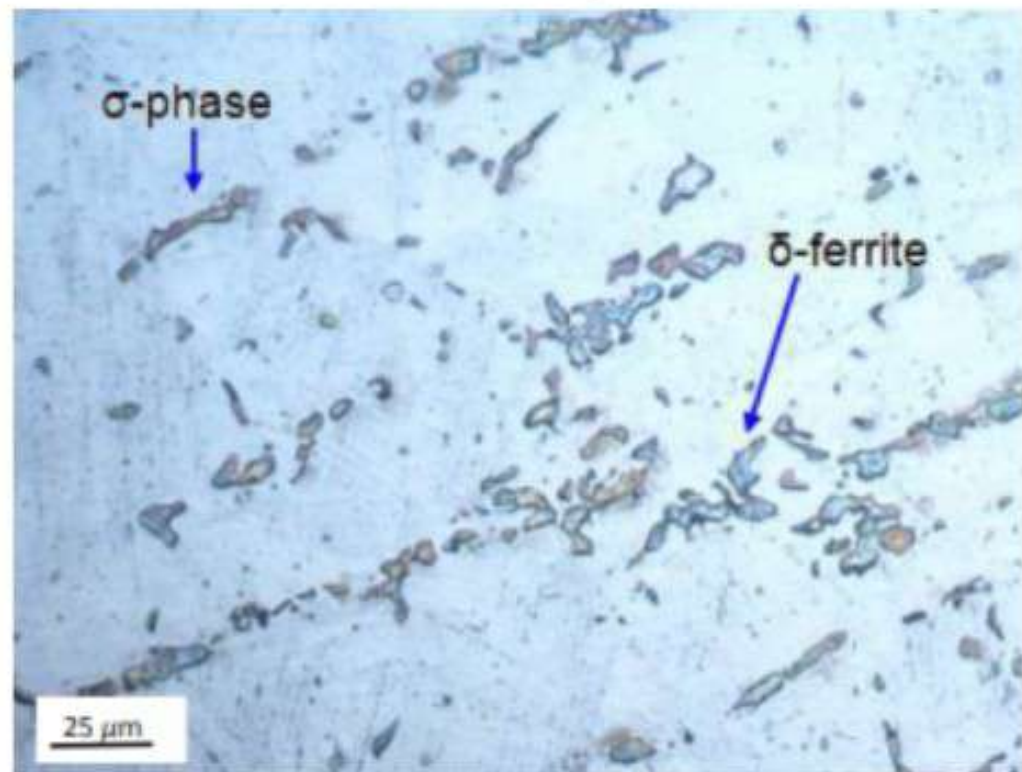
Fonte: Metals Handbook, 1973.

Isotermas do diagrama de fases Fe-Cr-Ni em diferentes temperaturas.

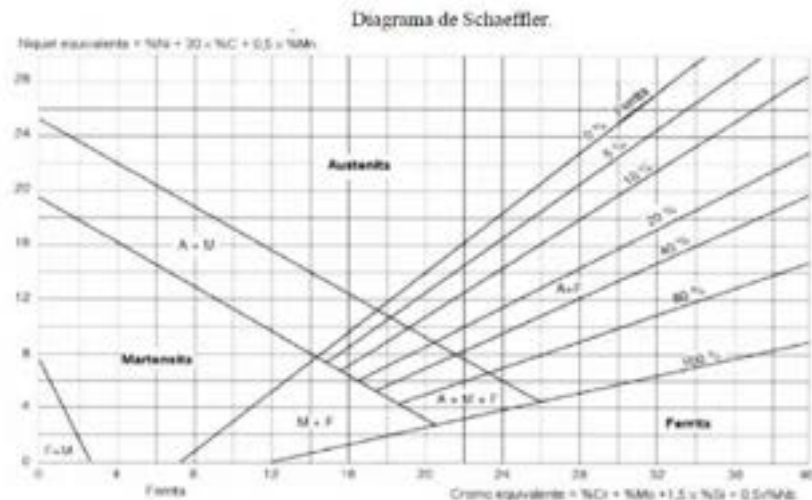


Fonte: Ansara et al. (1985).

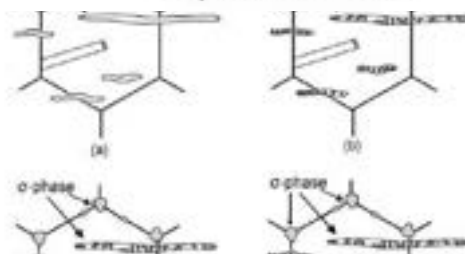
Microestrutura de um aço inoxidável 304H, contendo austenita, fase sigma e ferrita delta.



Fonte: Jordan e Maharaj (2020).



Adaptado de Schaeffler, 1949.

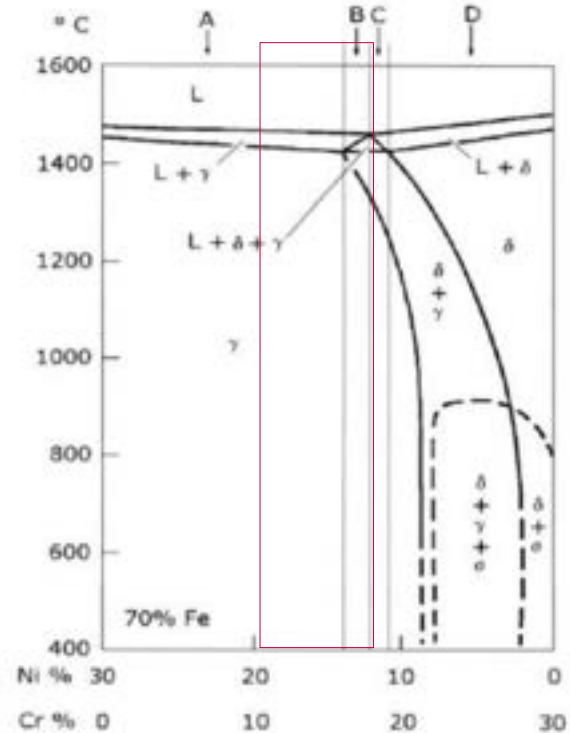


$$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1,5\%Si + 0,5\%Nb$$

$$Ni_{eq} = \%Ni + 30\%C + 0,5\%Mn$$

Pre-precipitation of sigma phase in austenite and ferrite. Without heating (a), the delta ferrite precipitates at the boundary. When the aging temperature increases (b), the sigma phase precipitates from the ferrite particles. When the aging temperature increases (c), the sigma phase precipitates at the triple points in the interphase boundaries. At (d), the precipitation of the lamellar sigma formation is more pronounced than in the other aging temperatures. Adapted from Karickhoff (1974).

Representação dos modos de solidificação na seção vertical do diagrama ternário Fe-Cr-Ni para 70% de ferro.



Fonte: Modenesi (2001).

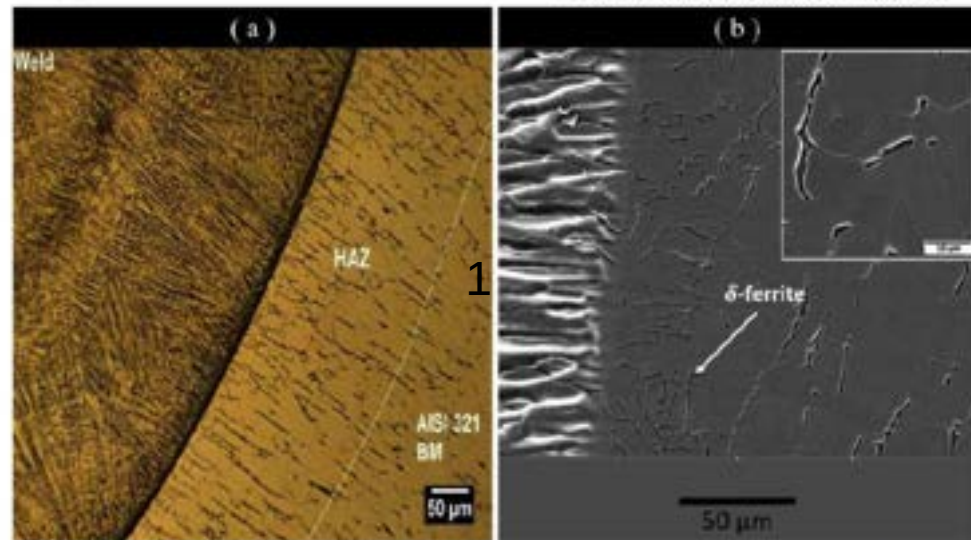
Ferrita delta

A ferrita delta aparece nos aços inoxidáveis austeníticos devido à presença de elementos estabilizadores de ferrita. A maneira pela qual a ferrita delta é formada, conforme item anterior, depende do modo de solidificação do aço inoxidável.

Quando esse microconstituente está presente em teores até 10% em aços inoxidáveis fundidos, ou 3% em aços inoxidáveis completamente solubilizados, sua presença é aceitável, e pode trazer benefícios, como a redução de trincas a quente na soldagem (PESSANHA, 2011).

N. Sejjari et al.

Journal of Manufacturing Processes 60 (2020) 86–95



Microstructure of the interface between AISI 321 SS and weld metal; (a) OM and (b) FESEM micrograph.

Em nenhuma das três amostras foi observada a formação de carbeto de cromo do tipo Cr_{23}C_6 , responsável pela depleção de Cr nos contornos de grão, prejudicando a resistência do aço inoxidável à corrosão intergranular em um fenômeno denominado sensitização. De acordo com o diagrama TTT (tempo-temperatura-transformação) mostrado na Figura 9, a precipitação de Cr_{23}C_6 de fato não era esperada para as amostras, pois todas possuíam teor de carbono inferior a 0,03%. Além disso, o tempo a qual o material foi submetido às temperaturas de sensitização (500-900 °C) não foi suficiente para a precipitação dos carbeto de cromo, pois a soldagem era automática.

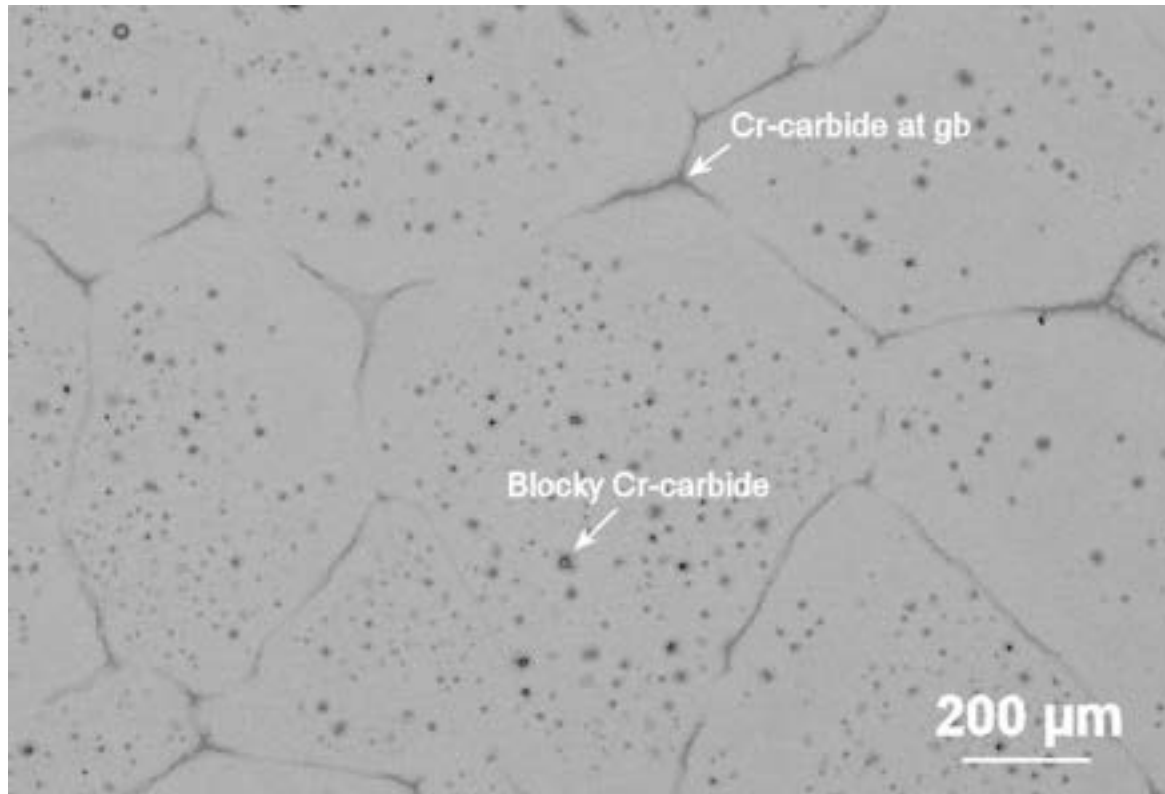
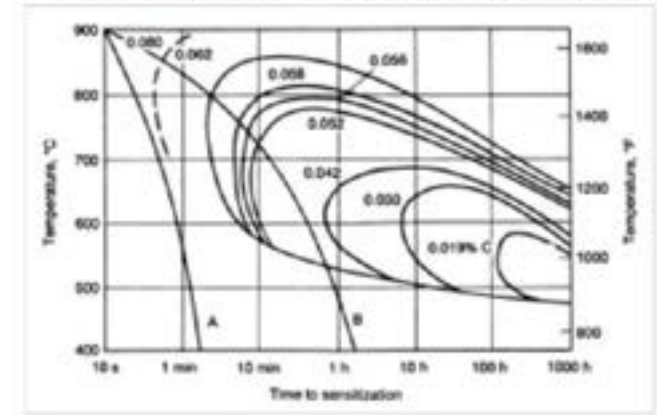
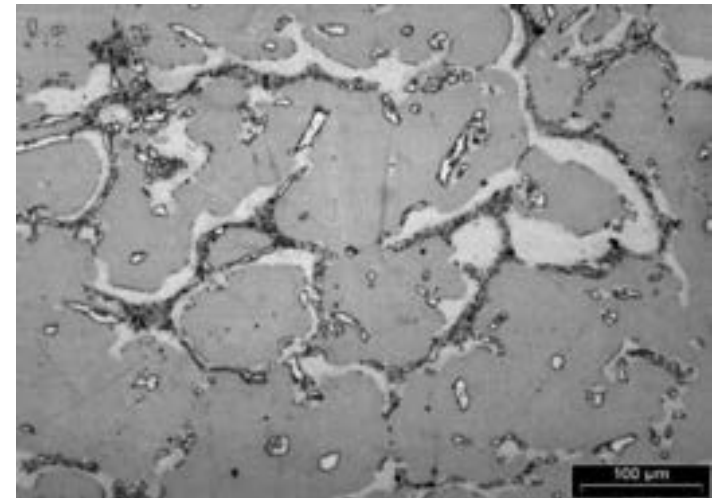


Diagrama TTT do Cr_{23}C_6 nos aços inoxidáveis da série 304.



Fonte: Davis (2006).



MATERIAIS E MÉTODOS

Porcentagem em massa dos elementos presentes nas amostras utilizadas.

Amostra	C	Mn	Si	N	Cr	Ni	Mo	Co	Nb
Tipo 1	0,0276	1,340	0,490	0,0004	18,11	8,02	0,066	0,144	0,000
Tipo 2	0,0202	1,270	0,62	0,0004	18,13	8,06	0,123	0,208	0,000
Tipo 3	0,0264	1,270	0,420	0,0004	18,16	8,00	0,162	0,181	0,000

Fonte: autoria própria.

Características de cada amostra estudada.

Amostras	Condição
Tipo 1	Produzida por soldagem TIG sem tratamento térmico de solubilização
Tipo 2	Produzida por soldagem TIG com tratamento térmico de solubilização
Tipo 3	Produzida por soldagem laser sem tratamento térmico de solubilização

Fonte: autoria própria.

Três diferentes aços inoxidáveis usados neste trabalho

Tratamento térmico

Foi retirada uma amostra com tratamento térmico de solubilização realizado em um forno de indução com atmosfera controlada de H_2 , pertencente à linha de produção de uma das formadoras com soldagem TIG. A potência do forno foi ajustada para que a temperatura atingisse 1040 °C, mínimo necessário para a solubilização adequada dos carbeto de cromo do tipo $Cr_{23}C_6$. O tubo ficou 15 segundos no interior do forno e 30 segundos no túnel de resfriamento com gás H_2 .

Parâmetros da soldagem TIG - amostra 1.

	1ª tocha	2ª tocha	3ª tocha
Corrente (A)	200	170	165
Voltagem (V)	13	14	10
Vazão do gás de proteção (L/min)	7	8	7
Velocidade (mm/min)	4000		
Aporte térmico por tocha (J/mm)	23,40	21,42	14,85
Aporte térmico total (J/mm)	59,67		

Fonte: autoria própria.

Parâmetros da soldagem TIG - amostra 2.

	1ª tocha	2ª tocha	3ª tocha
Corrente (A)	230	170	240
Voltagem (V)	13	14	13
Vazão do gás de proteção (L/min)	15	10	15
Velocidade (mm/min)	4000		
Aporte térmico por tocha (J/mm)	26,91	21,42	28,08
Aporte térmico total (J/mm)	76,41		

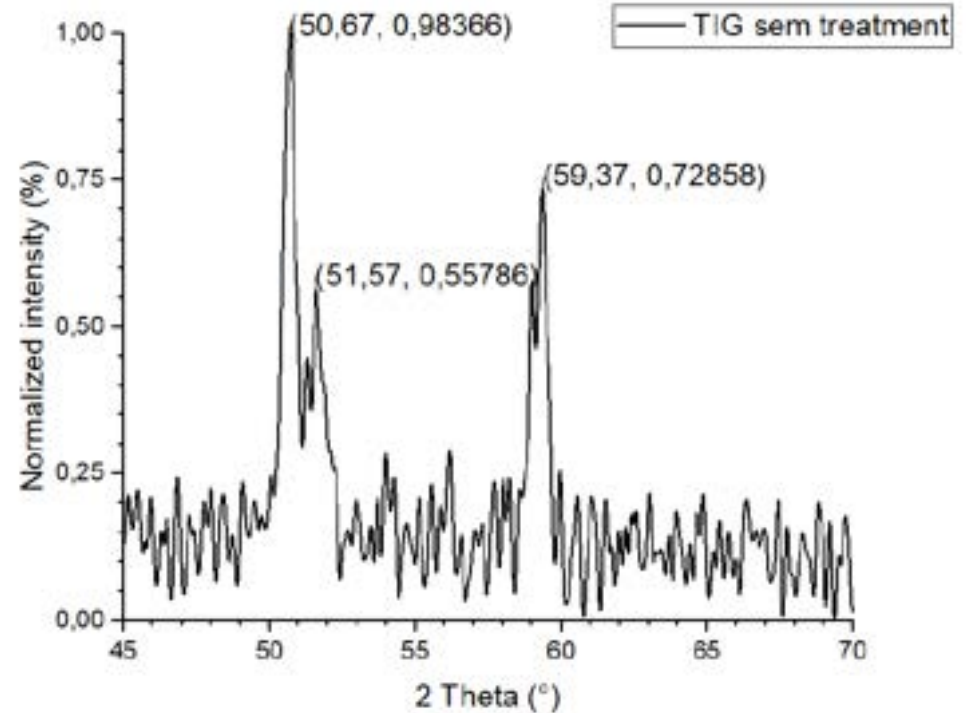
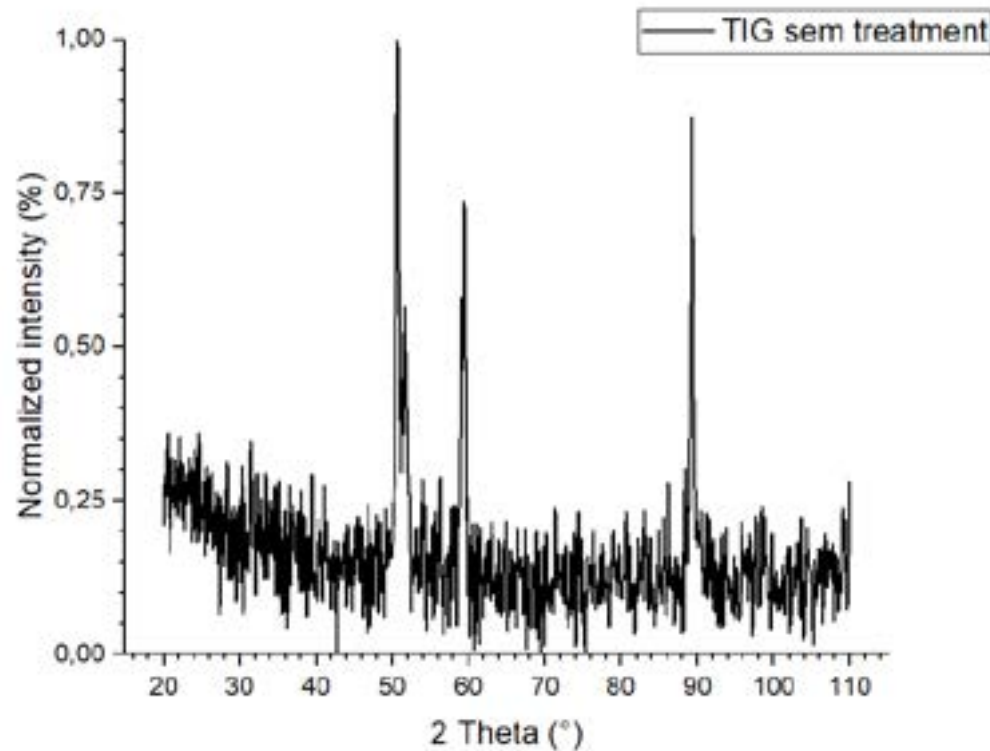
Fonte: autoria própria.

Parâmetros da soldagem Laser - amostra 3.

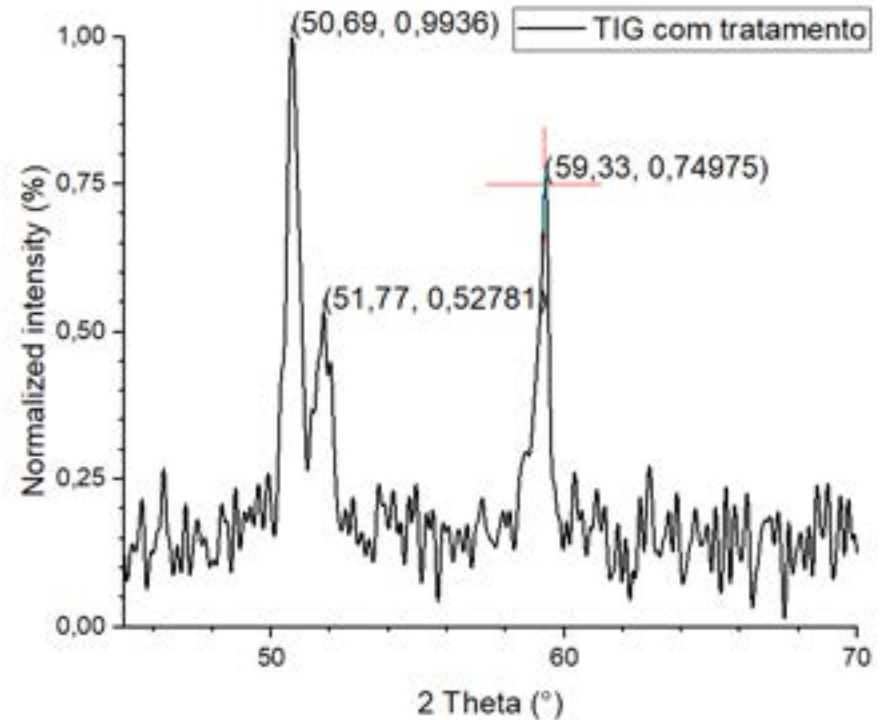
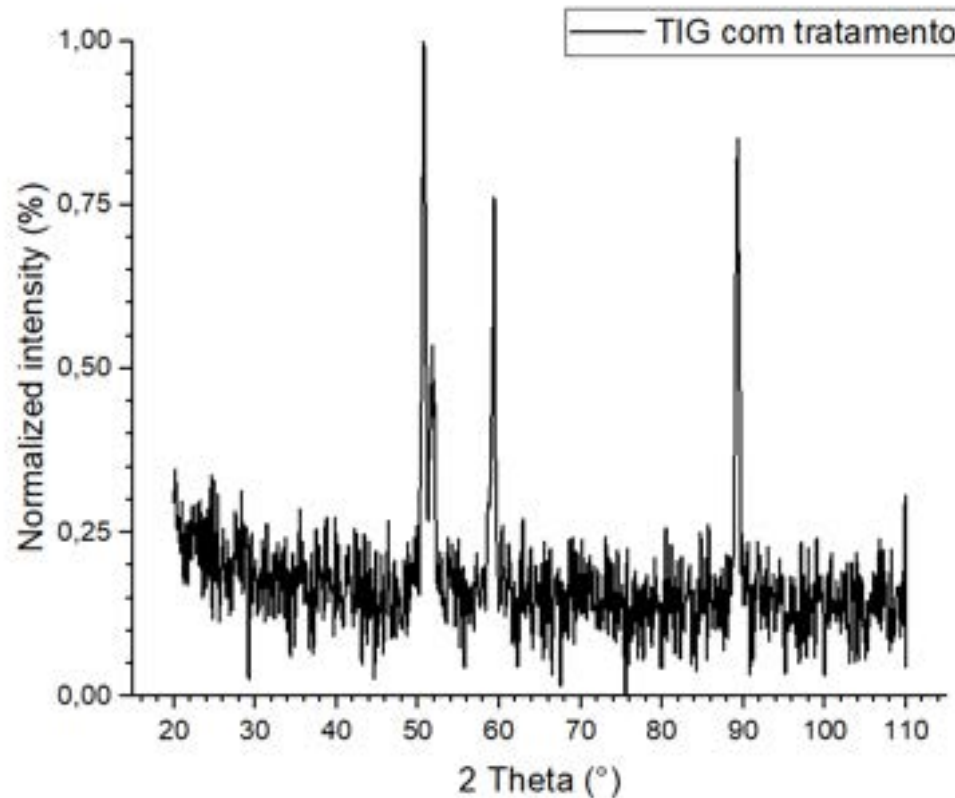
Altura da tocha (mm)	5,90
Potência (kW)	4,575
Gás de proteção (L/min)	15
Gás de purga (L/min)	40
Velocidade (mm/min)	6500
Fator K	457
Aporte térmico (J/mm)	25,34

Fonte: autoria própria.

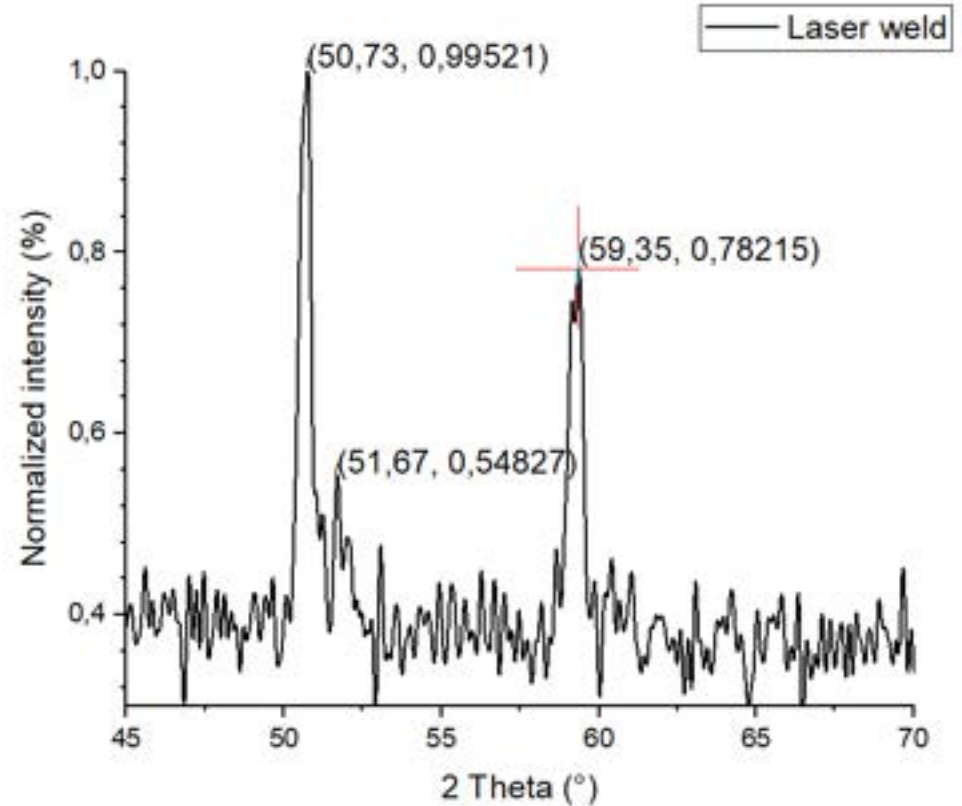
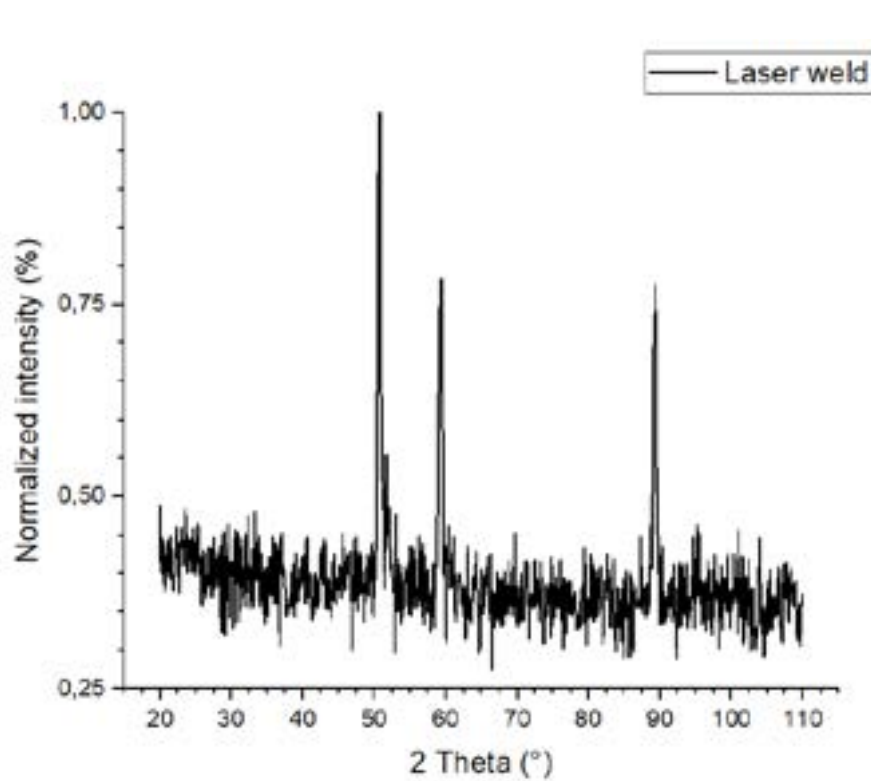
TIG sem tratamiento Weld



TIG com Tratamento WEL



Laser Welded



	Austenite		Ferrite		
Laser	0,99521	0,78215	0,54827	0,187887026	18,789%
TIG sem	0,98366	0,72858	0,55786	0,196371035	19,637%
TIG com	0,9936	0,74975	0,52781	0,185048669	18,505%

$$V_{\gamma} = \frac{1.4I_{\gamma}}{I_{\alpha} + 1.4I_{\gamma}} = \frac{1.4[(I_{\gamma}^{111} + I_{\gamma}^{200})/2]}{[(I_{\alpha}^{110} + I_{\alpha}^{200})/2] + 1.4[(I_{\gamma}^{111} + I_{\gamma}^{200})/2]}$$

Teores de ferrita delta quantificados pelo software ImageJ.

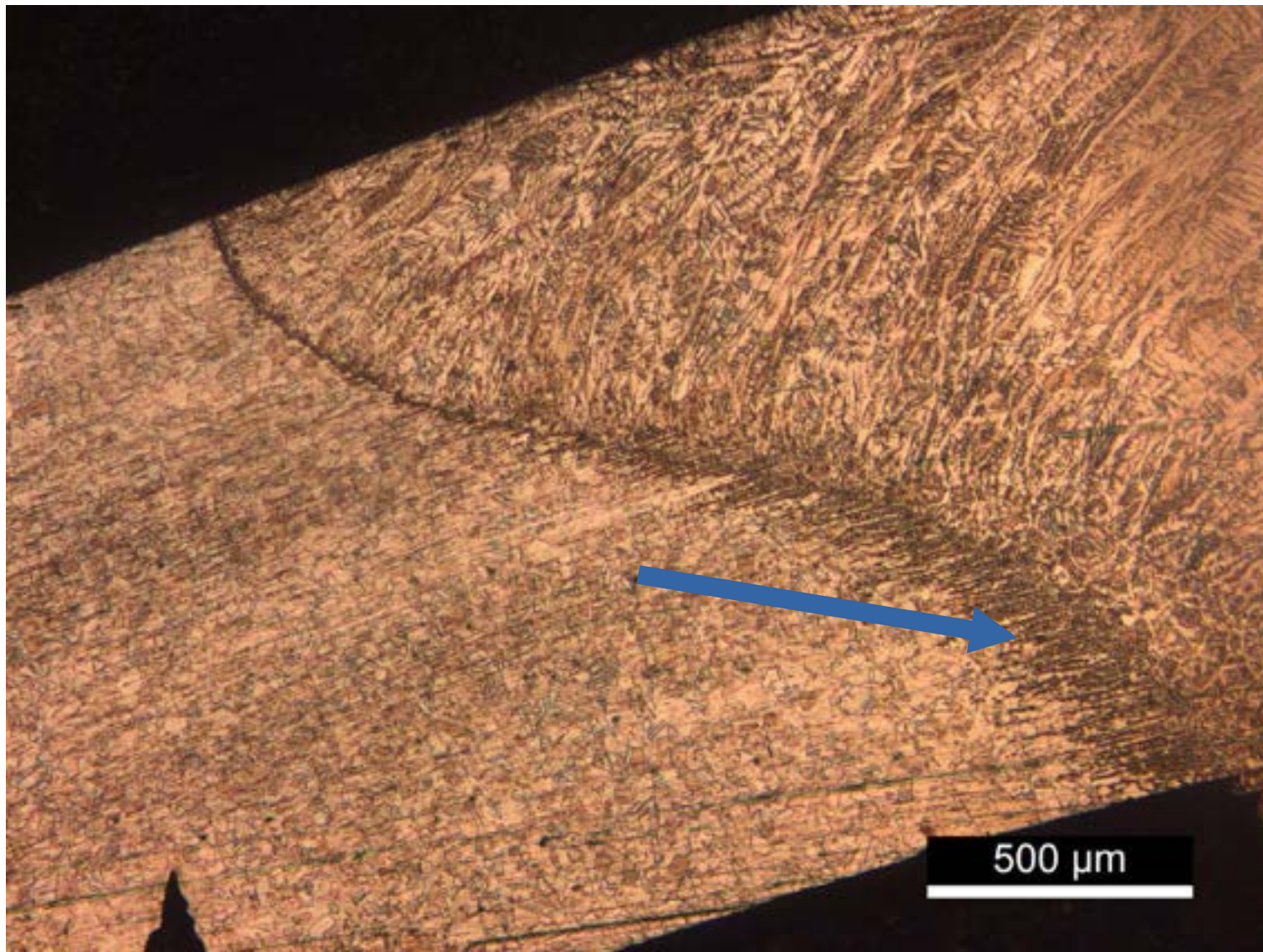
Amostra	Região analisada		
	Zona fundida	ZTA	Metal base
TIG sem T.T.	7,85%	8,45%	1,32%
TIG com T.T.	6,85%	6,86%	1,23%
Laser	1,04%	N/A	0,56%

Fonte: autoria própria.

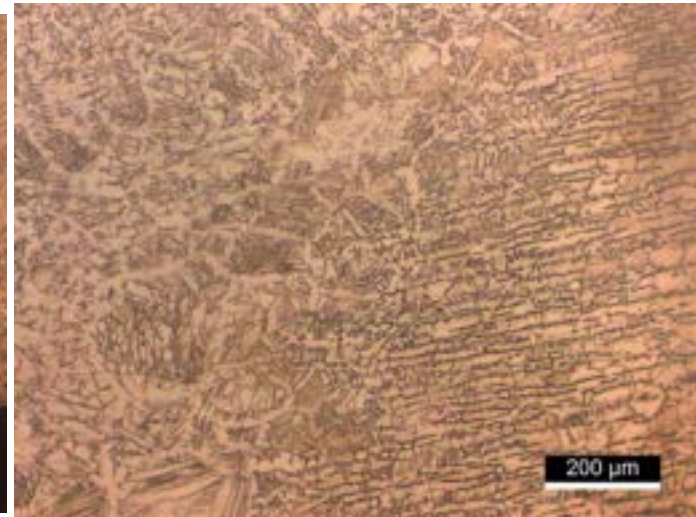
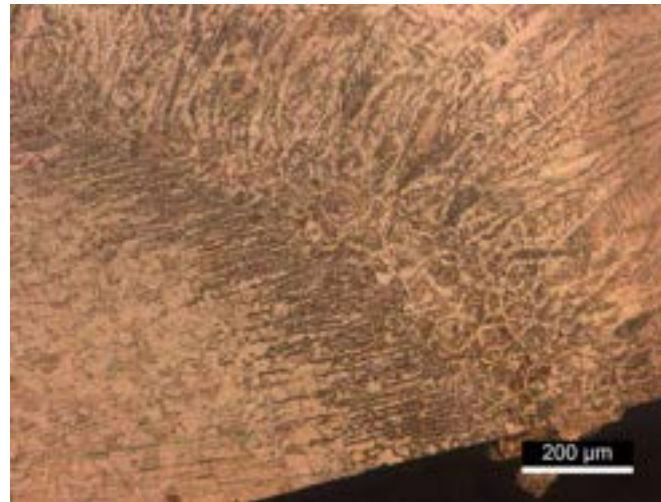
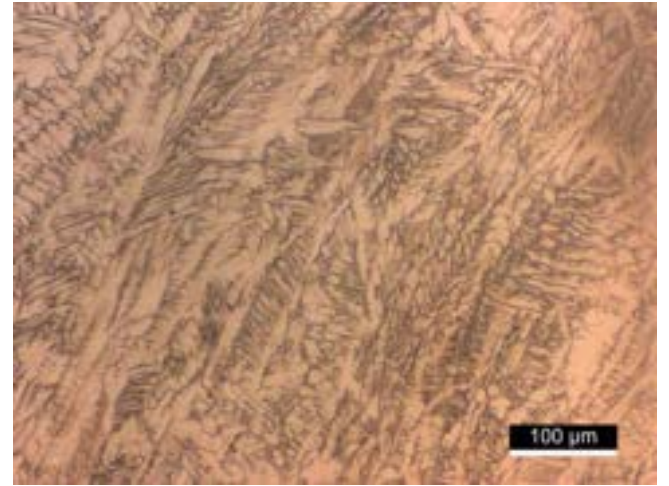
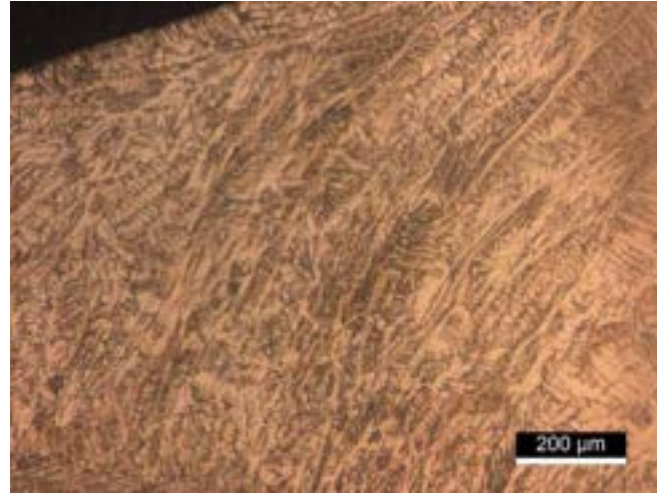
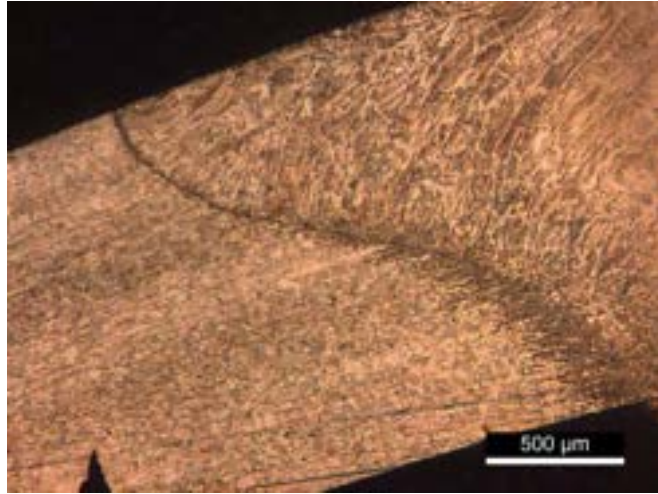
Teores de ferrita delta quantificados por difração de raios-X.

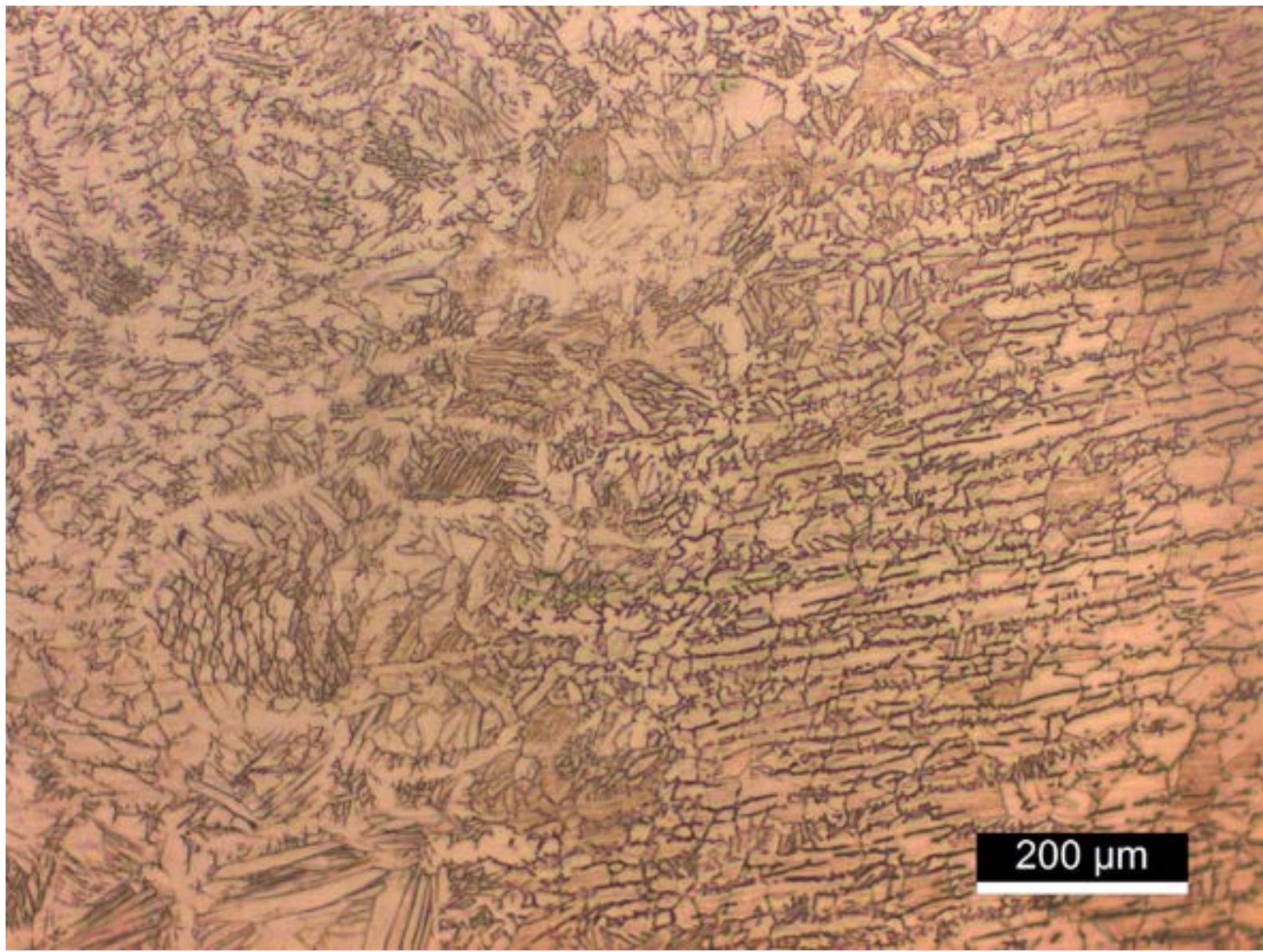
Amostra	Teor de δ
TIG sem T.T.	20,33%
TIG com T.T.	20,76%
Laser	21,12%

Fonte: autoria própria.

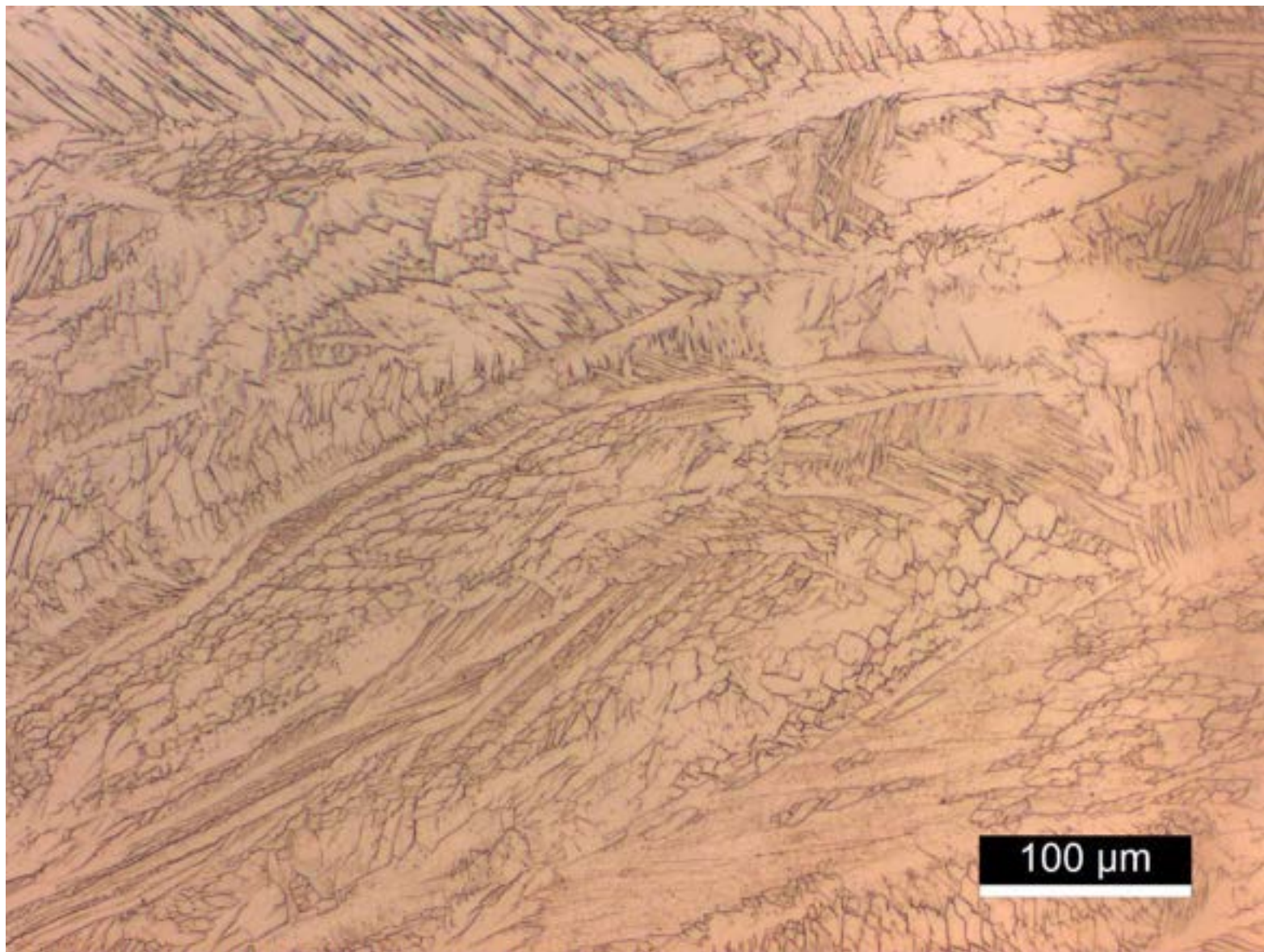


304 TIG sem

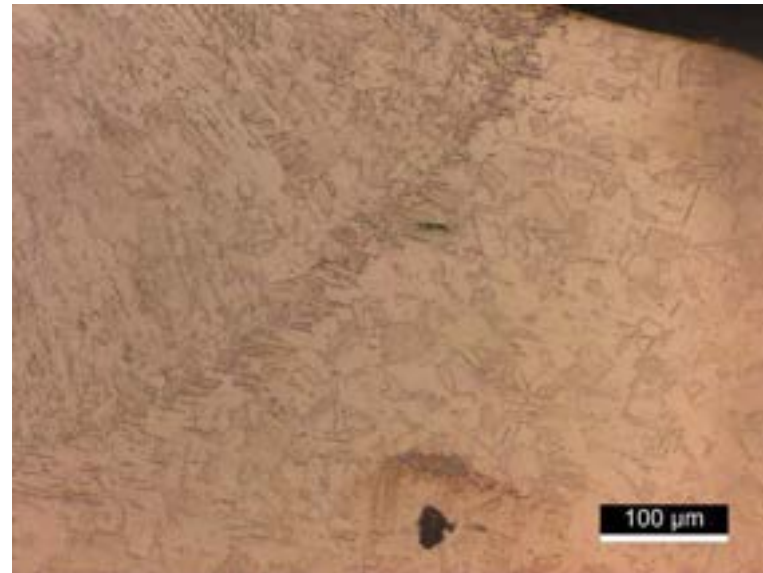
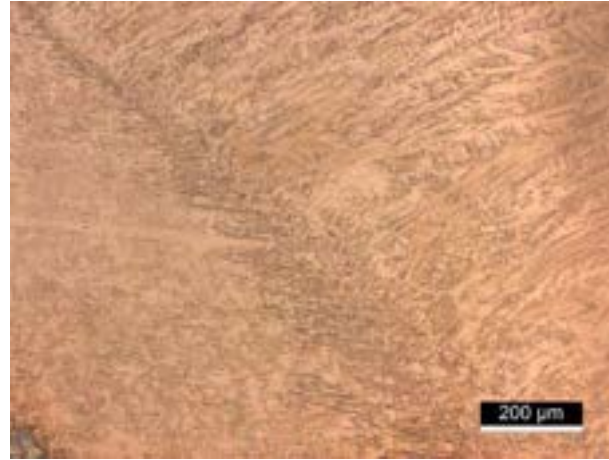
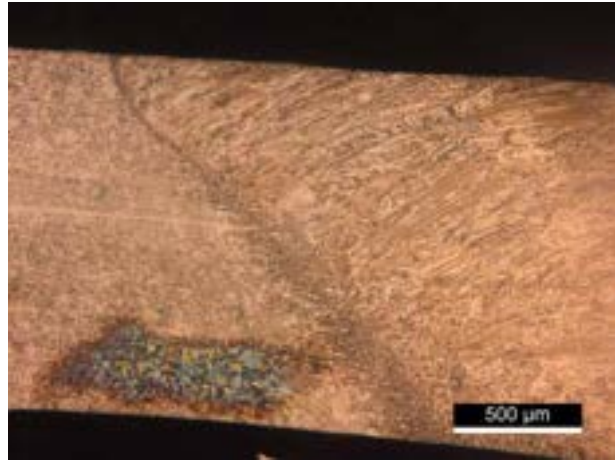




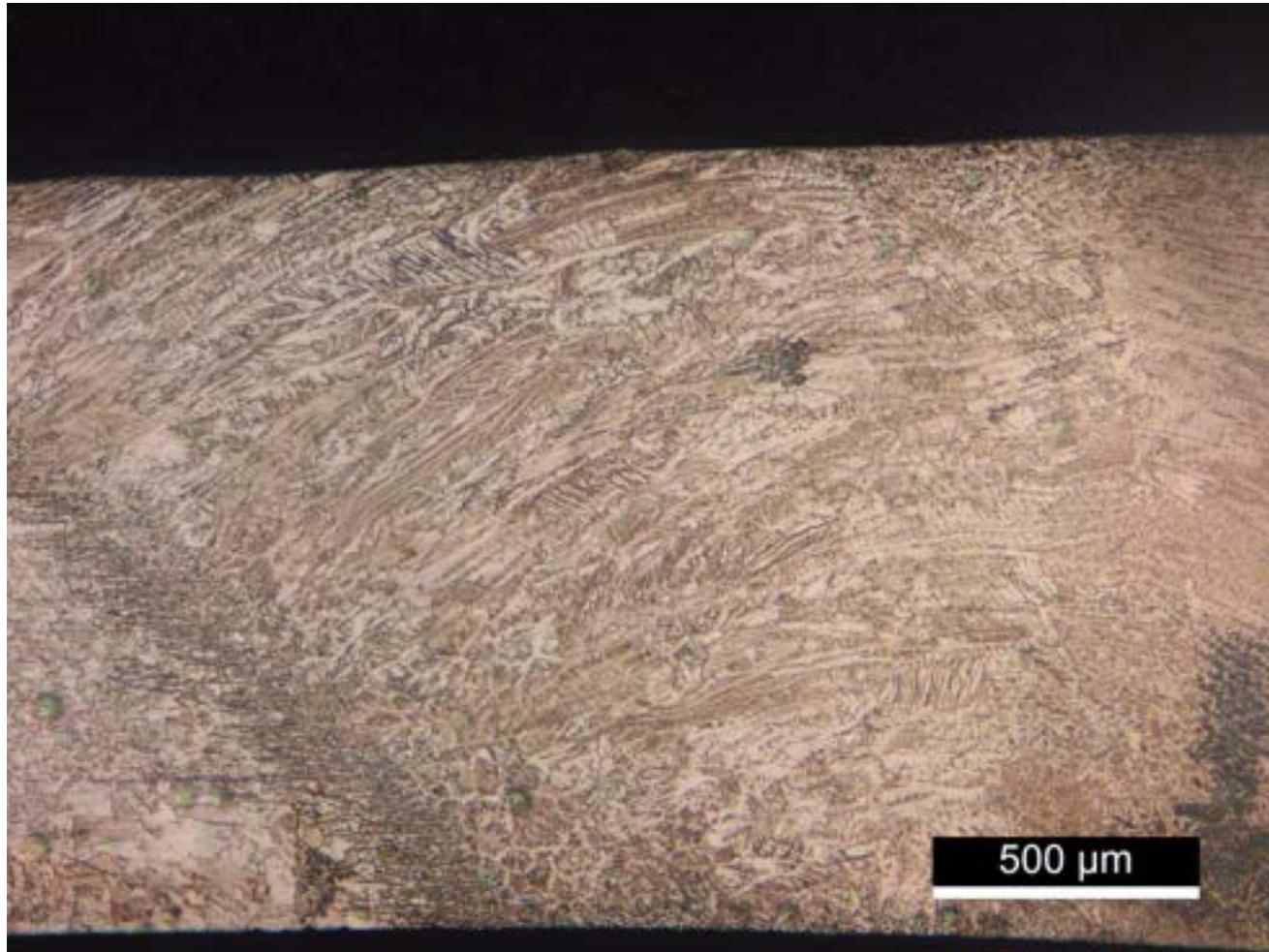
200 μm



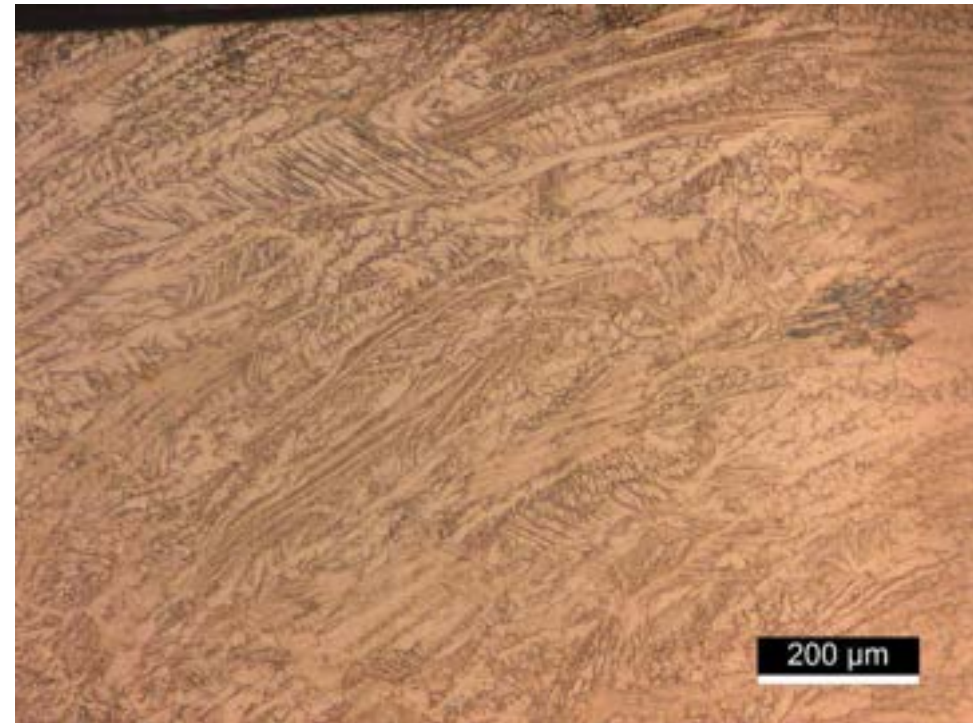
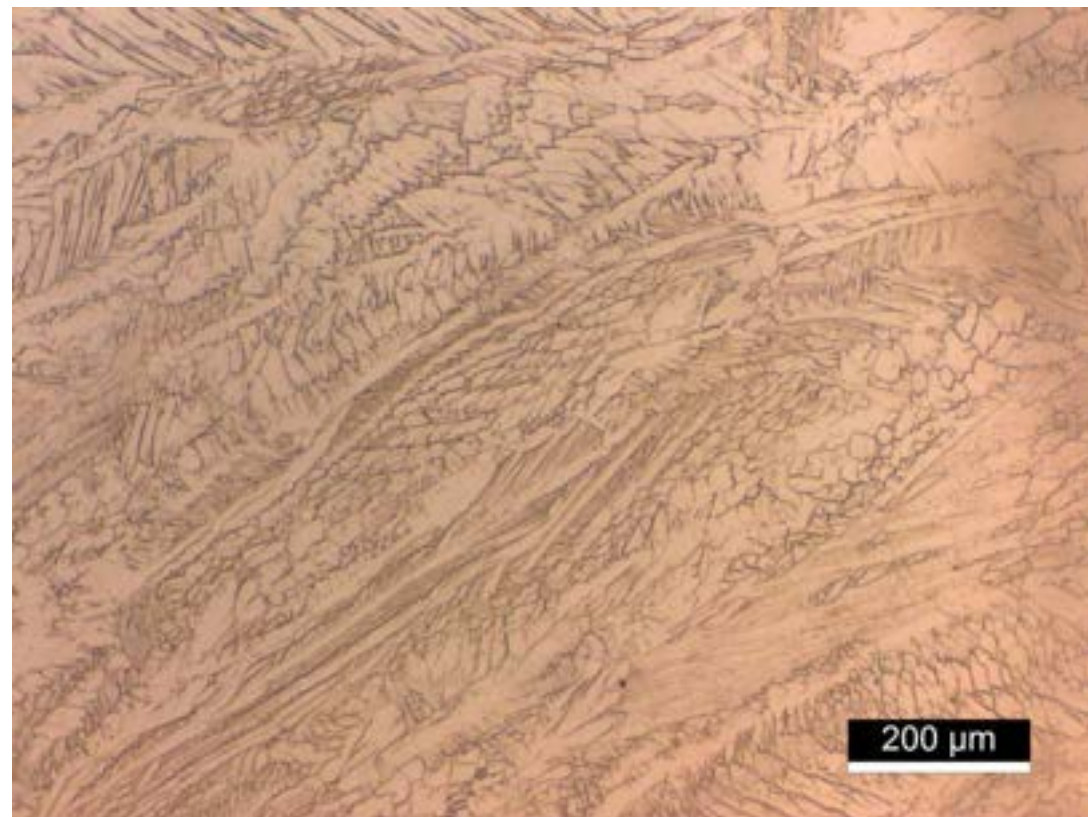
304 Tig com T



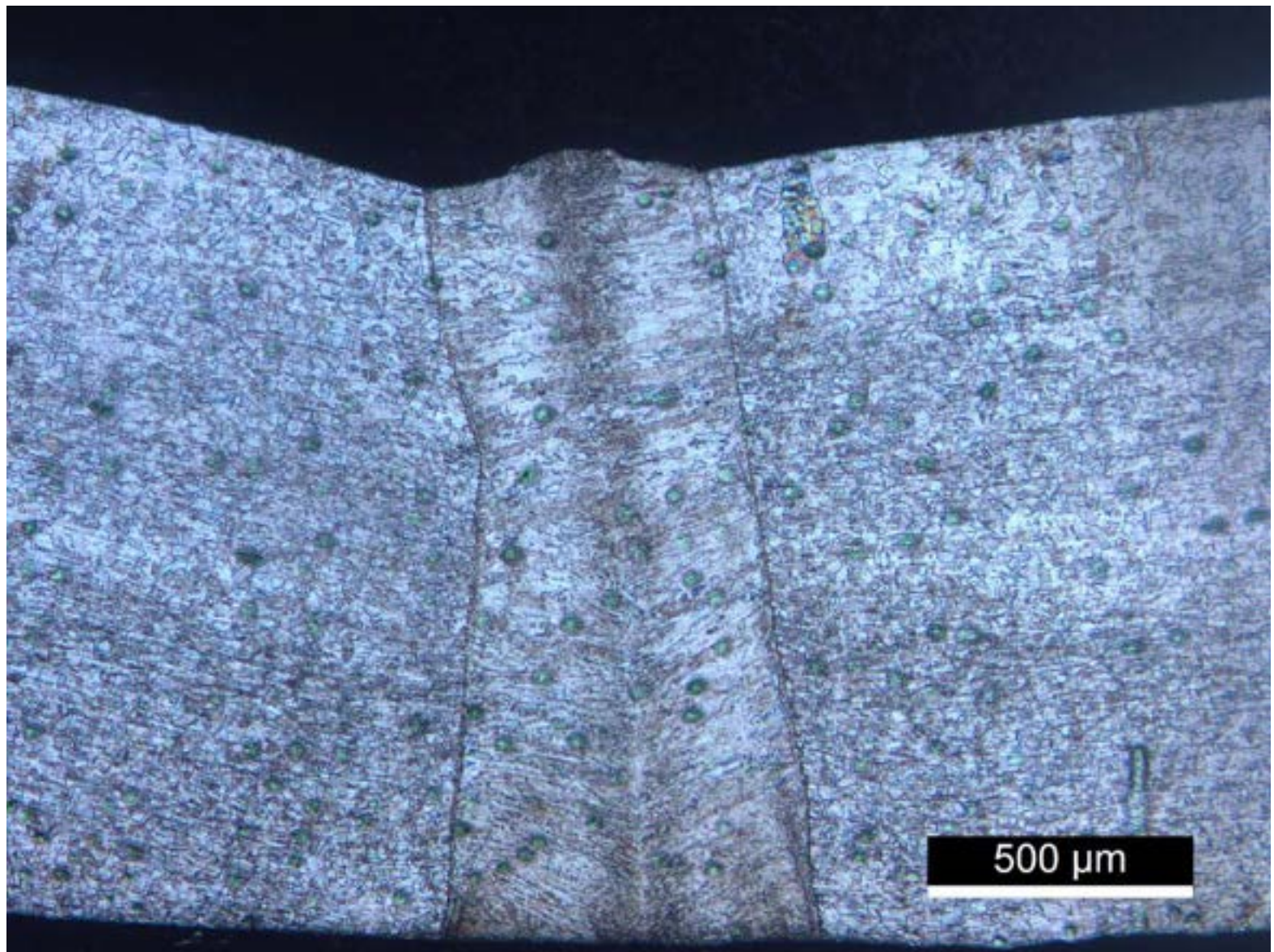
304 Tig com T ferrita delta

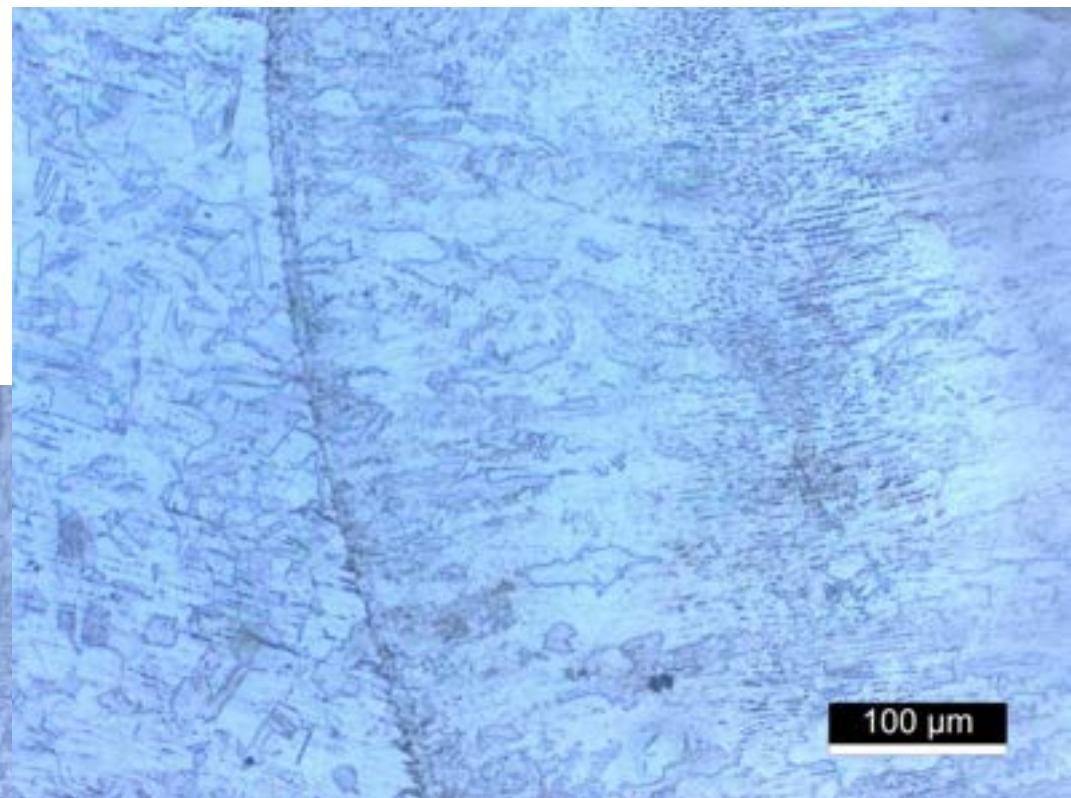


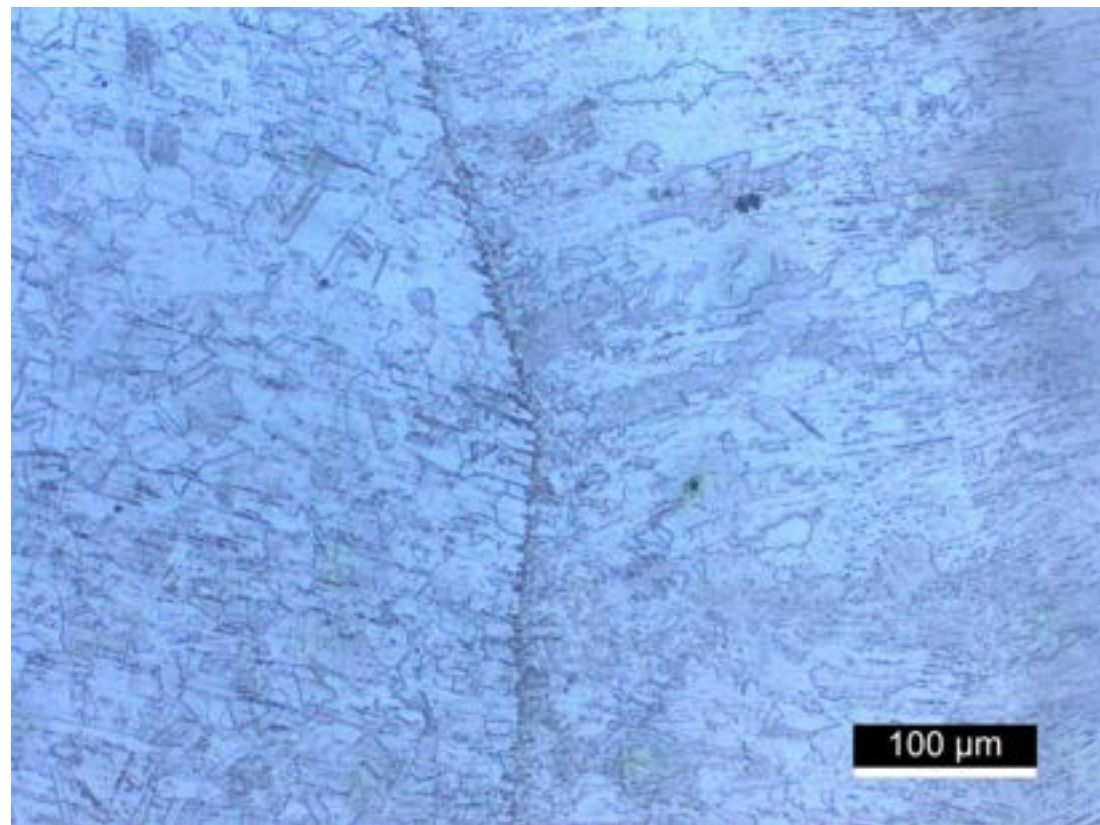
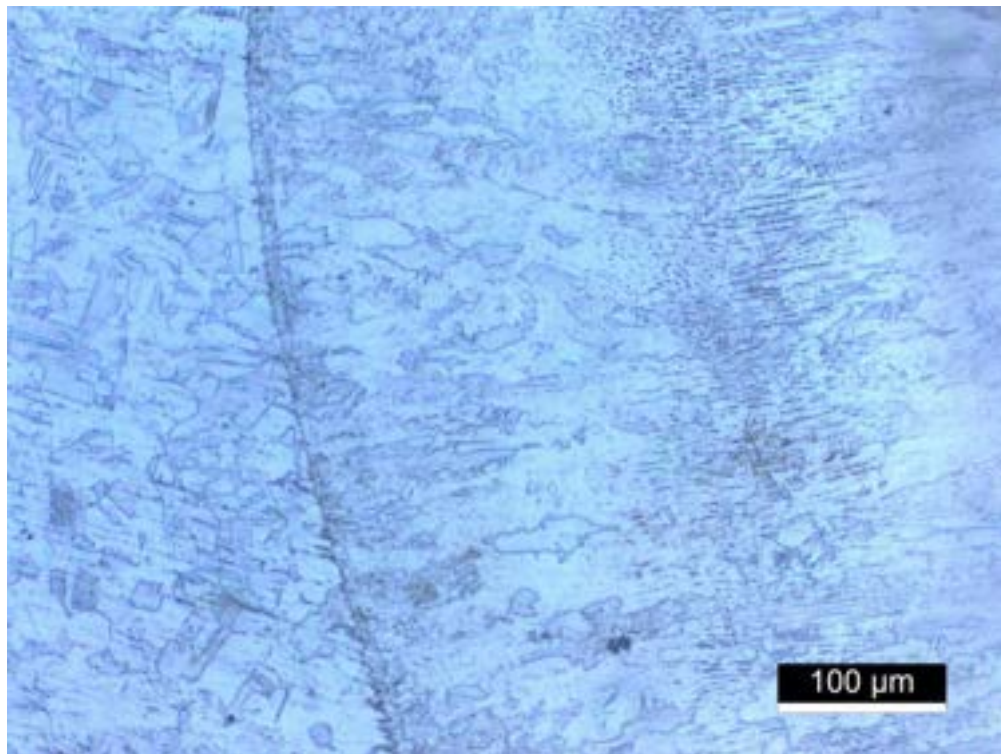
304 Tig com T ferrita delta



304 Laser





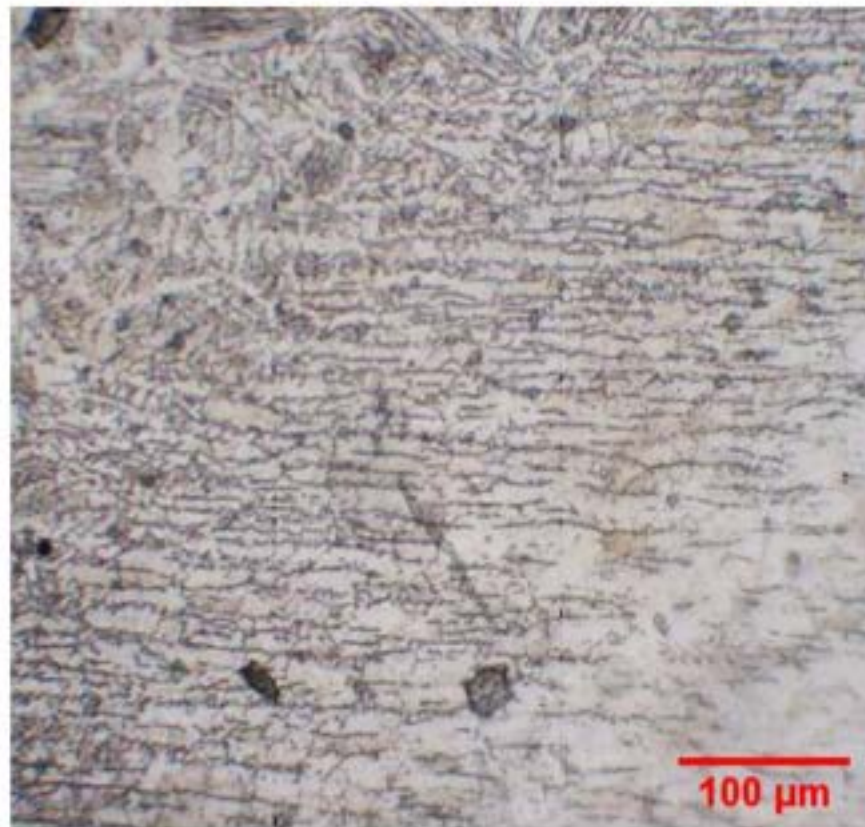


RESULTADOS

Metalografias da amostra de solda TIG, sem tratamento térmico, do metal base, da zona termicamente afetada (ZTA), e da zona fundida.



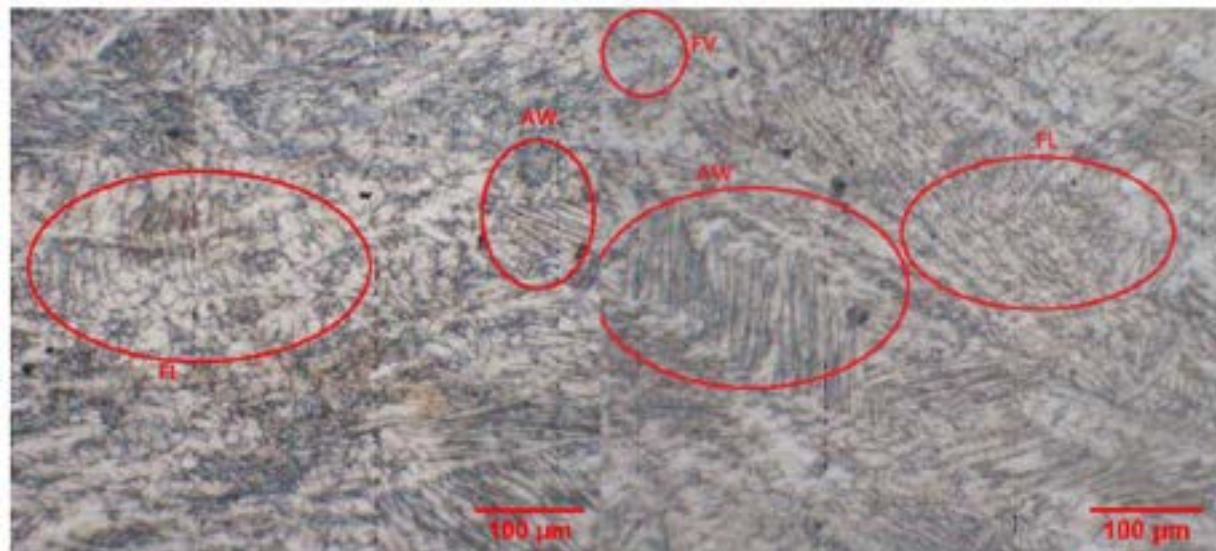
a. Metal base



b. ZTA



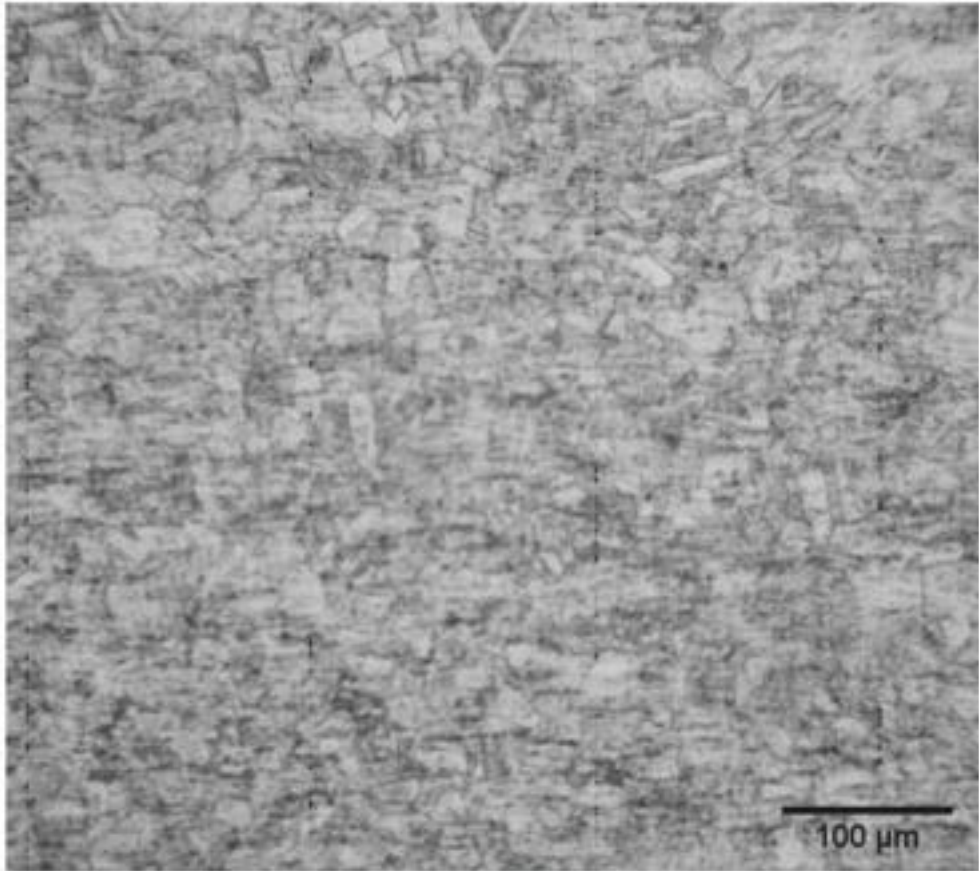
c. Zona fundida



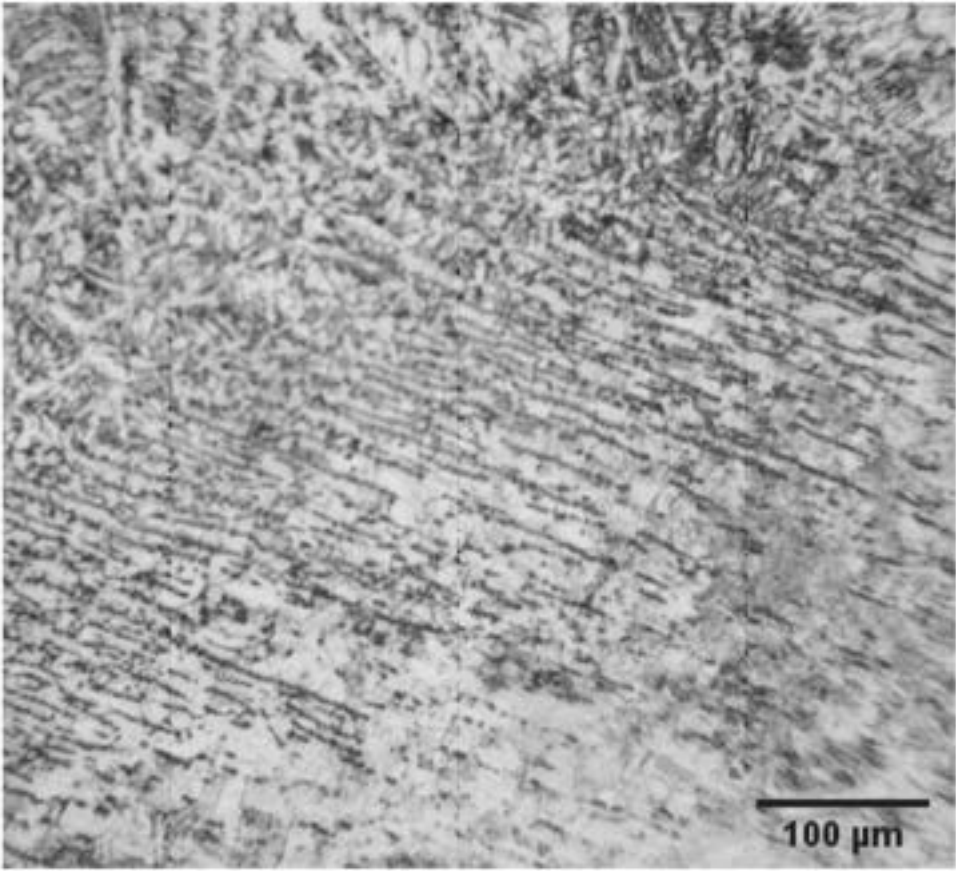
Zona fundida com maior ampliação, em que FL = Ferrita "lathy"; AW = Austenita de Widmanstätten, FV = ferrita vermicular.

Fonte: autoria própria.

Metalografias da amostra de solda TIG, com tratamento térmico, da zona fundida, zona termicamente afetada, e do metal base.



a. Metal base

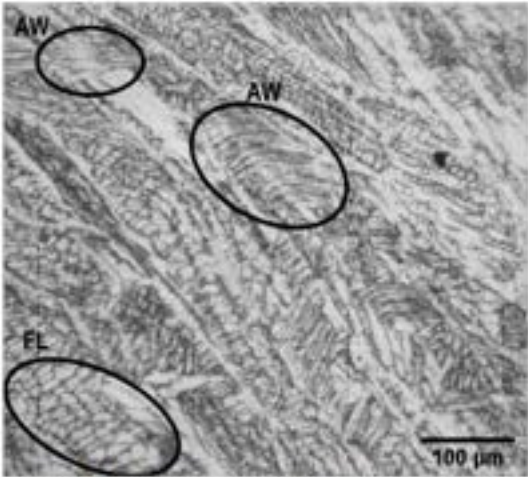


b. ZTA

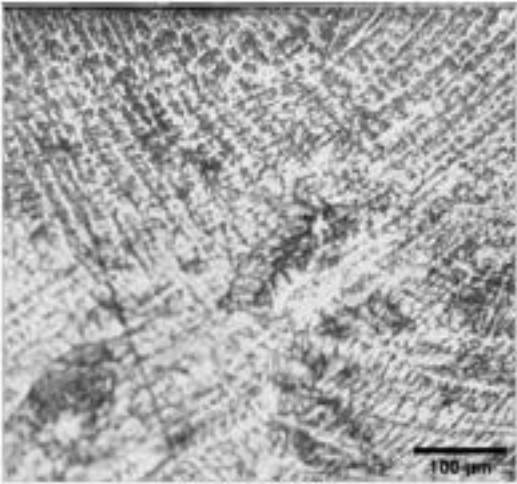
Metalografias da amostra de solda TIG, com tratamento térmico, da zona fundida, zona termicamente afetada, e do metal base.



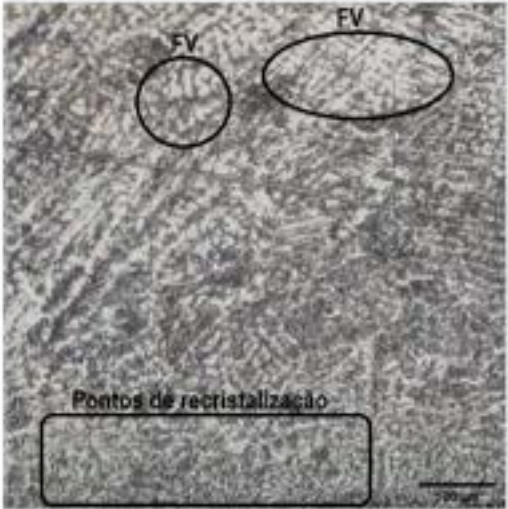
c. Zona fundida



d. Ampliação da zona fundida, em que FL = ferrita "lathy", AW = austenita de Widmanstätten

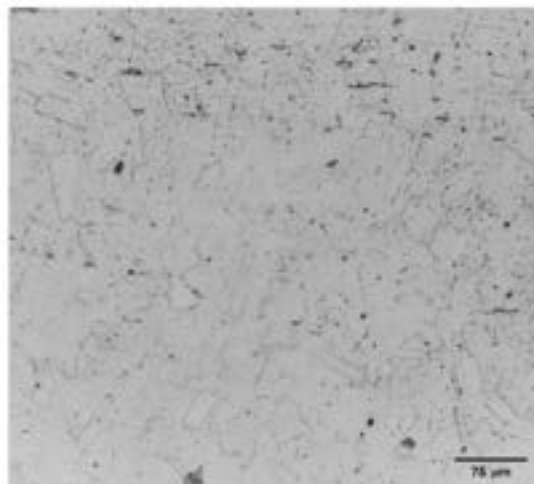


e. Face da solda

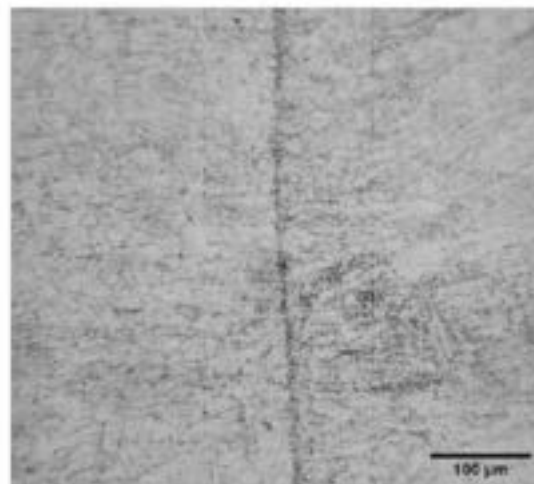


f. Raiz da solda

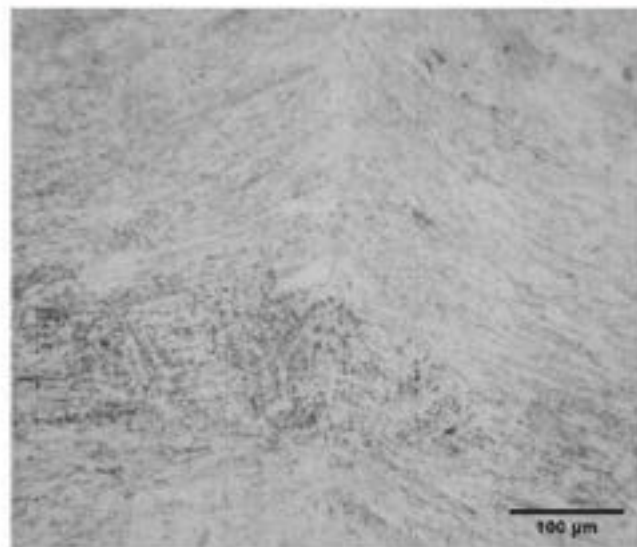
Laser



a. Metal base



b. Região de transição



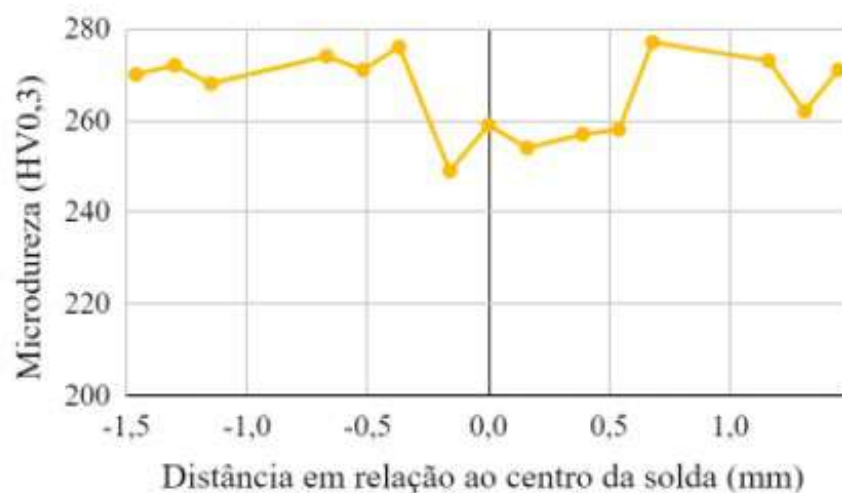
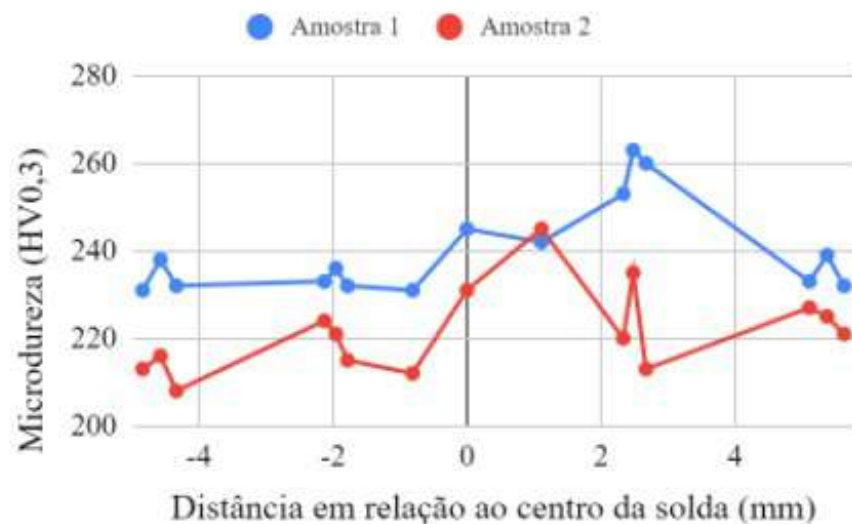
c. Zona fundida

Teores de ferrita delta quantificados pelo software ImageJ.

Amostra	Região analisada		
	Zona fundida	ZTA	Metal base
TIG sem T.T.	7,85%	8,45%	1,32%
TIG com T.T.	6,85%	6,86%	1,23%
Laser	1,04%	N/A	0,56%

Fonte: autoria própria.

Perfis de microdureza para as amostras 1, 2 e 3.



Resultados do Weld Decay Test.

	Amostra 1 - TIG sem T.T.	Amostra 2 - TIG com T.T.	Amostra 3 - Laser sem T.T.
Espessura inicial no metal base (mm)	1,556	1,530	1,524
Espessura inicial na solda (mm)	1,618	1,638	1,482
Espessura final no metal base (mm)	0,672	0,778	0,907
Espessura final na solda (mm)	0,528	0,920	0,871
Taxa de corrosão R	1,233	0,955	0,990
Disposição final	Aprovado	Aprovado	Aprovado

Fonte: autoria própria.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

FEITO DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM TIG E LASER NA FORMAÇÃO DE FERRITA DELTA NO AÇO INOXIDÁVEL 304L

Jefferson Douglas Santos de Melo – RA: 11201721563

Prof. Dr. Mohammad Masoumi

Santo André - SP
2022