

CAPÍTULO VI

AVALIAÇÃO DO REVESTIMENTO EM AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO E LIGAS DE COBALTO

São apresentados e discutidos, a seguir as características geométricas, rendimento de deposição, propriedades mecânicas e ensaios tribológicos para o processo de soldagem MIG/MAG com múltiplos arames, combinando composições diferentes no metal de adição.

O objetivo nesta etapa é avaliar a influência da combinação de aço inoxidável austenítico e ligas de cobalto, na soldagem de revestimento em chapas de aço carbono, para, em seguida, submeter estes corpos de prova a ensaios de erosão e cavitação.

Neste capítulo, primeiramente, foi realizada a avaliação da soldagem das chapas de teste. Em seguida, é exposto o estudo sobre o desgaste obtido por erosão e cavitação. Visa-se avaliar os corpos de prova em termos de resistência à perda de massa e caracterizar a superfície erodida. Ao final, a avaliação consiste na determinação de dureza e topografia superficial com avaliação dos parâmetros de rugosidade.

6.1. Soldagem dos revestimentos

São apresentadas a soldabilidade e as características das chapas de teste na soldagem pelo processo MIG/MAG arame frio na posição horizontal e MIG/MAG duplo arame paralelo e série na posição plana. Os arames são de aço inoxidável austenítico com especificação ER308LSi, combinado com uma liga de cobalto (*Stellite 6* ou *21*).

6.1.1. Condições de soldagem em MIG/MAG arame frio na posição horizontal

A Tabela 6.1 apresenta as condições de soldagem dos ensaios em MIG/MAG arame frio na posição horizontal.

Tabela 6.1 – Ensaio MIG/MAG arame frio na posição horizontal, DBCP = 17 mm

CS	U (V)	V _{alim} (m/min)	V _{alim AF} (m/min)	V _{solid} (cm/min)	Metal Adição	Arame Frio
AF3	23	7,5	1	80	ER308LSi	<i>Stellite 6</i>
AF4	23	7,5	1	80	ER308LSi	<i>Stellite 21</i>

Na Tabela 6.2, estão os parâmetros ajustados e monitorados nos experimentos.

Tabela 6.2 – Parâmetros ajustados e monitorados nos experimentos.

CS	Parâmetros obtidos					CS	Parâmetros obtidos				
	NC	I _{ef} (A)	I _m (A)	U _{ef} (V)	U _m (V)		NC	I _{ef} (A)	I _m (A)	U _{ef} (V)	U _m (V)
AF3	1	239,84	232,79	19,16	18,25	AF4	1	239,21	232,79	19,14	18,31
	2	238,84	231,91	19,45	18,72		2	239,22	232,08	19,22	18,53
	3	240,59	235,26	19,47	18,78		3	233,21	228,56	19,28	18,60
	4	238,26	230,37	19,48	18,81		4	233,31	226,68	19,22	18,47
	5	238,44	231,30	19,46	18,78		5	232,65	226,96	19,22	18,51

A Figura 6.1 mostra o aspecto dos cordões de solda obtidos para os ensaios. Nota-se um revestimento com bom aspecto superficial e presença de pouco respingo.



(c) AF3



(d) AF4

Figura 6.1 – Condições de soldagem para o processo MIG/MAG arame frio

Os resultados, em termos de rendimento de deposição e características geométricas, são apresentados na Tab. 6.3. Juntamente com os parâmetros geométricos, foi determinada a incerteza de medição (IN).

Os ensaios AF3 e AF4 apresentaram similaridade em relação à energia de soldagem e rendimento de deposição, com valores situados entre 97 e 98%. Os valores encontrados inclusive são superiores aos obtidos para as amostras soldadas com ambos os arames em aço inoxidável austenítico. A diluição apresentada para AF3 e AF4 é de 16 a 17%,

respectivamente, ou seja, maior do que os corpos de prova AF1 e AF2, com 13%, apresentado no Capítulo V.

Tabela 6.3 - Características geométricas gerais e rendimento de deposição para o MIG/MAG arame frio

CS	E (KJ/cm)	Rend (%)	P (mm)	L (mm)	R (mm)	R/L	$h_{\text{útil}}$ (mm)	A_p (mm ²)	A_R (mm ²)	Dil (%)
AF3	0,072	97,49	2,06	36,40	5,98	0,16	2,06	35,95	215,05	16,72
IN _{AF3}	-	-	0,06	0,36	0,07	-	0,06	1,84	2,94	-
AF4	0,071	98,52	2,284	36,816	6,369	0,17	2,284	34,390	206,920	16,62
IN _{AF4}	-	-	0,03	0,36	0,08	-	0,03	4,23	2,26	-

Como a soldagem na posição horizontal visa a uma aproximação com as condições reais de aplicação em campo, percebeu-se uma maior dificuldade no processo ao usar a mistura de ligas no MIG/MAG arame frio. Isto porque, no caso de adição do arame frio em liga de cobalto ($V_{\text{alim AF}}$), a poça tornou-se muito volumosa, gerando constantemente *humps*.

Apesar desta dificuldade de soldabilidade, foi possível a retirada dos corpos de prova das condições de soldagem AF3 e AF4 para os ensaios de erosão e cavitação, que serão discutidos ao longo deste capítulo.

6.1.2. Condições de soldagem em MIG/MAG duplo arame paralelo posição plana

Os ensaios propostos neste tópico envolvem a realização de dois testes, sendo um arame energizado em aço inoxidável austenítico e outro em liga de cobalto, apresentado na Tab. 6.4. As condições de soldagem são similares ao teste DA1 na soldagem em aço inoxidável austenítico, apresentado no Capítulo V.

Tabela 6.4 – Condições de soldagem em MIG/MAG duplo arame paralelo

CS	U (V)	V_{alim} (m/min)	V_{sold} (cm/min)	Arame 1 (Mestre)	Arame 2 (Escravo)
DA5	30	12	60	ER308LSi	<i>Stellite 6</i>
DA6	30	12	60	ER308LSi	<i>Stellite 21</i>

Os parâmetros ajustados e monitorados para estes ensaios são apresentados na Tab. 6.5. Apesar do ajuste similar, nota-se uma variação na corrente de soldagem para o arame escravo em liga de cobalto (sub-índice $I_{\text{ef } 2}/I_{\text{m } 2}$ na Tab. 6.5). Nos ensaios, usou-se uma DBCP de 25 mm e uma mistura de gás de proteção de Ar + 2% O₂ com vazão de 30 l/min.

Tabela 6.5 – Parâmetros ajustados e monitorados para o MIG/MAG duplo arame paralelo

CS	Parâmetros Ajustados		Parâmetros Obtidos								
	$V_{alim\ 1}$	V_{sold}	NC	I_{ef1}	I_{ef2}	I_{m1}	I_{m2}	U_{ef1}	U_{ef2}	U_{m1}	U_{m2}
	$V_{alim\ 2}$			(A)	(A)	(A)	(A)	(V)	(V)	(V)	(V)
DA5	12	60	1	252,53	268,26	252,22	268,06	29,94	29,95	29,93	29,94
			2	249,23	280,09	249,03	279,91	29,92	29,94	29,91	29,93
			3	246,76	283,01	246,53	282,88	29,92	29,92	29,91	29,91
DA6	12	60	1	251,50	268,74	251,16	268,33	29,94	29,95	29,92	29,94
			2	254,06	281,20	253,75	281,05	29,94	29,94	29,92	29,94
			3	254,06	279,67	248,31	279,51	29,94	29,94	29,92	29,93

A formação de um cordão de solda com aspecto regular foi um dos critérios adotados para a escolha dos parâmetros de soldagem na combinação em aço inoxidável austenítico e ligas de cobalto. Este objetivo foi alcançado e esta combinação proporcionou um aspecto superficial adequado do revestimento, de acordo com a Fig. 6.2 (a) e (b). Um fato a ser notado é a presença de pequenas mordeduras na lateral do primeiro passe.



(a) DA5



(b) DA6

Figura 6.2 – Ensaio MIG/MAG duplo arame para metal de adição ER308LSi combinado com *Stellite 6* (a) e *Stellite 21* (b)

Mesmo com este critério de selecionar os parâmetros de soldagem com base nos cordões previamente obtidos em aço inoxidável austenítico, o arco apresentou particularidades na formação da poça fundida. Visualmente, durante a soldagem, percebe-se que o arco gerado pelo arame em liga de cobalto não sofre uma atração magnética, como ocorre no aço inoxidável austenítico.

A Tabela 6.6 apresenta os resultados em termos de rendimento de deposição e características geométricas gerais. O rendimento de deposição do ensaio DA5 é o menor dos ensaios com MIG/MAG duplo arame paralelo. A diluição apresenta-se em um nível similar aos demais ensaios.

Tabela 6.6 - Características geométricas gerais e rendimento de deposição para o MIG/MAG duplo arame

CS	E (KJ/cm)	Rend (%)	P (mm)	L (mm)	R (mm)	R/L	$h_{\text{útil}}$ (mm)	A_p (mm ²)	A_R (mm ²)	Dil (%)
DA5	0,262	92,73	2,61	37,05	4,04	0,11	3,18	63,97	113,83	35,98
IN _{DA5}	-	-	1,78	1,82	1,78	-	1,78	3,07	2,04	-
DA6	0,263	96,00	3,76	37,11	4,40	0,12	3,18	74,34	125,53	37,19
IN _{DA6}	-	-	1,78	2,02	1,78	-	1,78	3,33	1,65	-

Na sequência desta pesquisa, foram retirados corpos de prova de regiões homogêneas dos cordões de solda para a avaliação das amostras em relação à erosão e cavitação.

6.1.3. Condições de soldagem em MIG/MAG duplo arame série posição plana

Para o processo MIG/MAG duplo arame em série, propôs-se as condições de soldagem apresentadas na Tab. 6.7. Da mesma forma, o objetivo foi a combinação de arames visando a obtenção de um cordão de solda adequado.

A Tabela 6.8 apresenta os parâmetros ajustados e monitorados para estes dois experimentos. Estes ensaios possuem parâmetros de soldagem similares à DS1 soldado com aço inoxidável austenítico, apresentado no Capítulo V.

Tabela 6.7 – Ensaio MIG/MAG duplo arame série

CS	U_1 (V)	U_2 (V)	V_{alim1} (m/min)	V_{alim2} (m/min)	V_{sold} (cm/min)	Arame 1 (Mestre)	Arame 2 (Escravo)
DS3	32	30	14	12	80	ER308LSi	Stellite 6
DS4	32	30	14	12	80	ER308LSi	Stellite21

A condição de soldagem DS3 e DS4 usou o aço inoxidável austenítico no arame mestre (V_{alim1}) e a adição de arames em liga de cobalto no escravo (V_{alim2}). Os passes de solda, neste caso, ficaram excessivamente estreitos, quando comparados com DS1 e DS2, como pode ser visto na Fig. 6.3.

Os resultados em termos de rendimento de deposição e características geométricas gerais são apresentados na Tab. 6.9.

Tabela 6.8 – Parâmetros ajustados e monitorados nos experimentos com variação na velocidade de alimentação e velocidade de soldagem e Ar+2%O₂ (U = 30 V e DBCP = 25 mm)

CS	Parâmetros Ajustados		Parâmetros Obtidos								
	V _{alim1} / V _{alim2}	V _{sold}	NC	I _{ef1} (A)	I _{ef2} (A)	I _{m1} (A)	I _{m2} (A)	U _{ef1} (V)	U _{ef2} (V)	U _{m1} (V)	U _{m2} (V)
DS3	14/12	80	1	295,76	241,11	295,22	240,23	32,07	29,85	32,05	29,80
			2	299,83	251,99	299,64	251,54	32,07	29,77	32,05	29,75
			3	307,07	246,39	306,97	246,12	32,06	29,78	32,05	29,76
DS4	14/12	80	1	267,49	242,41	266,91	239,98	32,07	30,05	32,05	29,89
			2	269,48	261,84	269,17	260,88	32,07	29,90	32,06	29,84
			3	284,01	252,23	283,61	250,23	32,08	30,00	32,06	29,84



(a)



(b)

Figura 6.3 – Cordão de solda para o teste (a) DS3 e (b) DS4

Tabela 6.9 - Características geométricas gerais e rendimento de deposição

CS	E (KJ/cm)	Rend (%)	P (mm)	L (mm)	R (mm)	R/L	h _{útil} (mm)	A _p (mm ²)	A _R (mm ²)	Dil (%)
DS3	0,212	93,84	3,29	31,21	3,11	0,11	1,66	64,93	77,37	45,63
IN _{DS3}	-	-	0,25	0,35	0,21	-	0,05	1,06	0,77	-
DS4	0,198	93,41	2,30	25,65	3,97	0,09	2,79	40,18	76,38	34,47
IN _{DS4}	-	-	0,08	0,54	0,22	-	0,21	0,40	2,30	-

* E - energia de soldagem; Rend - Rendimento de Deposição; P - penetração; L - largura; R - reforço; h_{útil} - altura útil; A_p - área penetração; A_R - área reforço; Dil - diluição.

Apesar de um ajuste extremamente cuidadoso do corpo de prova, ocorreram variações de ordem geométrica, que provocaram a formação de cordões de solda mais afastados, no caso de DA3, e passes compactos, no caso de DA4 (Fig. 6.4).

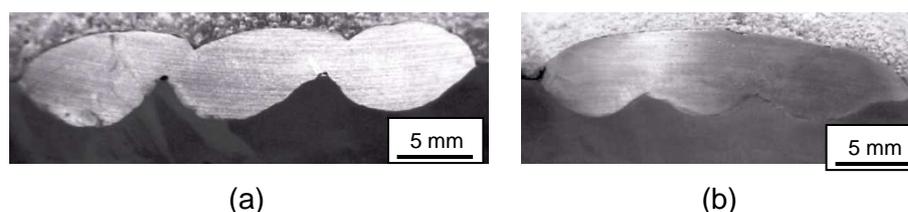


Figura 6.4 – Seção transversal do cordão de solda (a) DA3 e (b) DA4

Mesmo utilizando condições idênticas de soldagem, ocorreram grandes variações na dinâmica da poça, ao alterar o arame escravo para ligas de cobalto. Existe a necessidade em trabalhos futuros de analisar, de forma apurada, a influência da atração dos arcos, devido à ação do campo magnético, usando filmagens de alta velocidade.

6.2. Ensaio de Erosão

As chapas de testes foram submetidas aos ensaios de erosão com a retirada do corpo de prova de forma similar ao discutido no item 3.6.1, na região entre o 4º e o 5º passe no processo MIG/MAG arame frio e no 2º e 3º passe para os processos MIG/MAG duplo arame. Na primeira parte deste item, serão apresentados os ensaios de forma individual e, em seguida, será feita uma discussão de forma comparativa. A Tabela 6.10 apresenta os corpos de prova a serem submetidos à erosão.

Tabela 6.10 – Corpos de prova avaliados na erosão

CS	Processo de Soldagem	Arame 1	Arame 2
AF3	MIG/MAG arame frio	ER308LSi	<i>Stellite 6</i>
AF4	MIG/MAG arame frio	ER308LSi	<i>Stellite 21</i>
DA5	MIG/MAG duplo arame paralelo	ER308LSi	<i>Stellite 6</i>
DA6	MIG/MAG duplo arame paralelo	ER308LSi	<i>Stellite 21</i>
DS3	MIG/MAG duplo arame série	ER308LSi	<i>Stellite 6</i>
DS4	MIG/MAG duplo arame série	ER308LSi	<i>Stellite 21</i>

6.2.1. Ensaio de Erosão em MIG/MAG arame frio

Os ensaios erosivos foram realizados nas amostras soldadas pelo processo MIG/MAG arame frio, denominadas de AF3 e AF4. A Tabela C.1, no Apêndice C, apresenta os resultados para a amostra AF3 soldada com a mistura de arame eletrodo ER308LSi e *Stellite 6*.

Na Figura 6.5, são apresentados os resultados para a taxa de erosão e perda de massa acumulada. Para este ensaio, o período de incubação provavelmente foi superado aos 60 minutos. A Figura 6.6 apresenta a taxa de erosão média para o ensaio AF3.

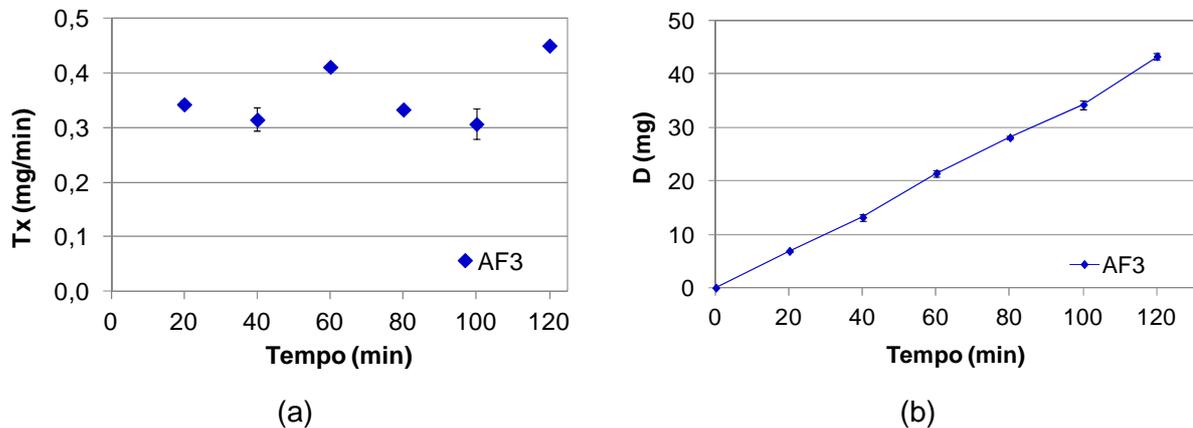


Figura 6.5 – Evolução da (a) taxa de erosão e do (b) desgaste para o teste AF3

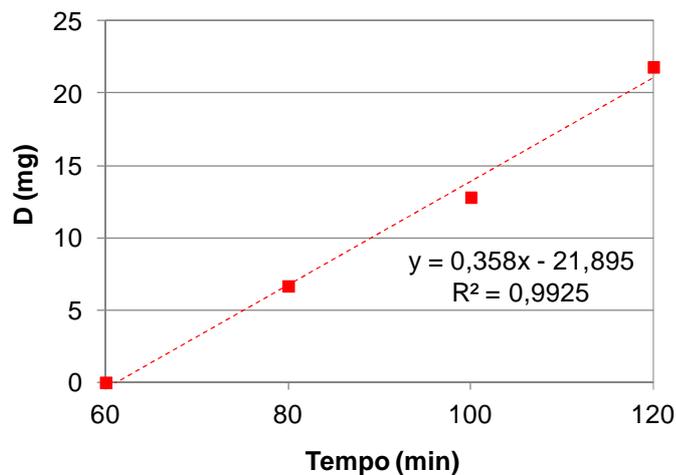


Figura 6.6 – Taxa de erosão para a amostra AF3

Uma característica idêntica aos testes com aço inoxidável austenítico é o aumento da perda de massa no ponto de 120 minutos, ocasionando valores de desgaste similares a este caso.

Comparando a amostra AF1 (apresentada no item 5.2.1 do Capítulo V) com a AF3, verifica-se que os valores das taxas de erosão são próximos. Em AF3, mesmo com a presença da liga de cobalto (*Stellite 6*), a taxa de erosão ficou em 0,36 mg/min e perda de massa acumulada em 43,21 mg. Na amostra AF1, tem-se os valores de taxa de erosão de 0,36 mg/min e perda de massa acumulada de 36,78 mg.

No ensaio erosivo a 90° de Levin, DuPont e Marder (1995), o aço inoxidável austenítico 316 L apresentou uma taxa de erosão de 10 mm³/min. Os mesmos autores mostram que o *Stellite 6* submetido a condições idênticas de desgaste erosivo teve uma taxa de erosão de 11,9 mm³/min. Os depósitos de 316 possuem uma dureza Vickers de 200 HV e os de liga *Stellite 6*, o valor de 450 HV. Por fim, estes autores concluíram que materiais tradicionalmente resistentes à abrasão, como o *Stellite 6*, não necessariamente terão um desempenho diferenciado na erosão a 90°. Aparentemente, a situação é similar ao adicionar pequenas quantidades de *Stellite 6* ao aço inoxidável austenítico na soldagem MIG/MAG arame frio, ou seja, sua influência é praticamente nula no aumento da resistência à erosão.

O teste AF4 com a mistura de aço inoxidável austenítico e *Stellite 21* tem seu desempenho a erosão em termos de taxa de erosão e perda de massa acumulada, apresentada na Tab. C.2 e Fig. 6.7.

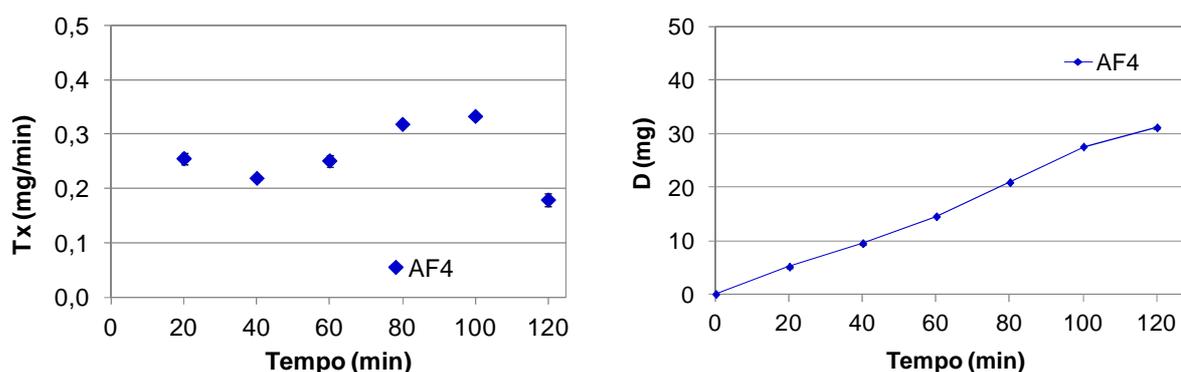


Figura 6.7 – Evolução da (a) taxa de erosão e do (b) desgaste para o teste AF4

Um ponto importante a destacar foi o comportamento diferenciado de AF4 em relação à AF3. A superação da incubação foi deslocada para o período entre 80 e 100 minutos em AF4. Ao final do ensaio em 120 minutos, o valor de taxa de erosão menor é um comportamento contrário ao observado para os resultados em aço inoxidável austenítico (ver Fig. 5.6 e 5.8 do Capítulo V). Diante desses fatos, o valor da taxa de erosão foi de 0,28 mg/min (Fig. 6.8).

Comparando os resultados de AF3 e AF4, verifica-se que a adição da liga *Stellite 21* ao aço inoxidável austenítico, AF4, ($T_x = 0,28$ mg/min) proporcionou menores taxas de erosão do que em AF3 ($T_x = 0,36$ mg/min), com uso da liga *Stellite 6*. Fato semelhante foi também encontrado por Nsoesie et al. (2014) para a incidência normal (90°).

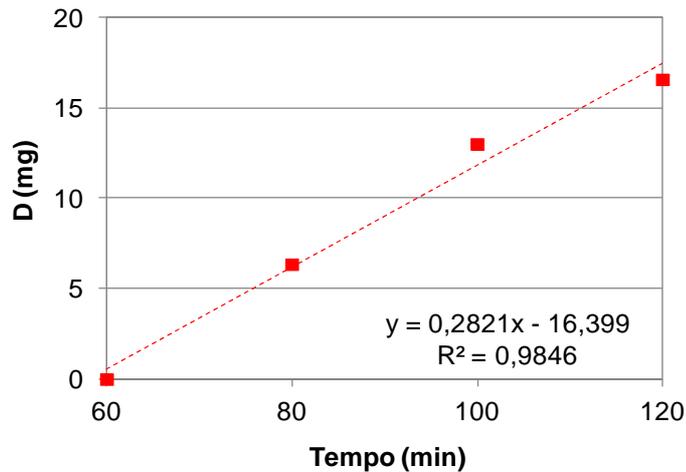


Figura 6.8 – Taxa de erosão para a amostra AF4

6.2.2. Ensaios de Erosão em MIG/MAG duplo arame paralelo

Nos ensaios com MIG/MAG duplo arame paralelo, as quantidades adicionadas das ligas de cobalto são maiores em relação aos ensaios em MIG/MAG arame frio. Isto ocorre porque a velocidade de alimentação de ambos os arames é igual no processo MIG/MAG duplo arame paralelo. A Tabela C.3 e a Fig. 6.9 apresentam os resultados para o teste DA5.

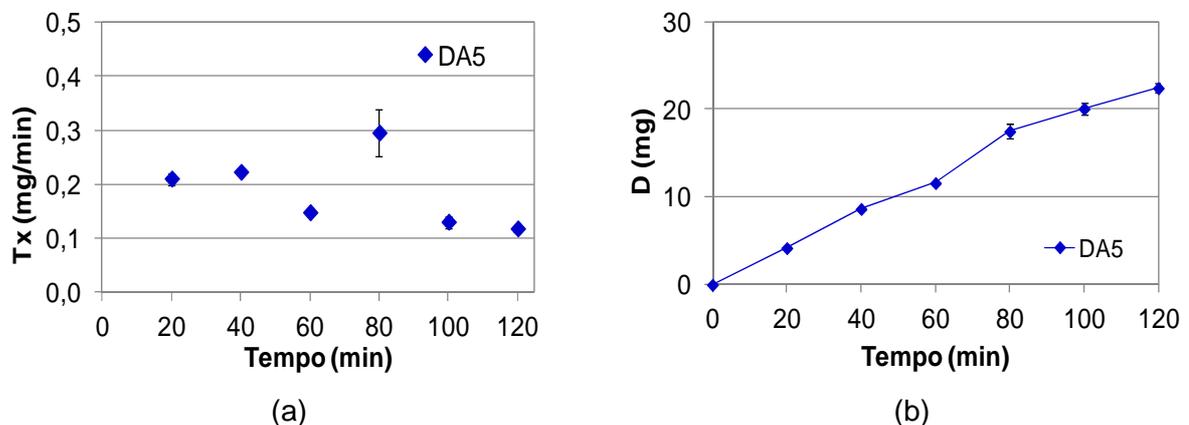


Figura 6.9 - Evolução da (a) taxa de erosão e do (b) desgaste para o teste DA5

Na Figura 6.9 (a), a maior taxa de erosão ocorreu aos 80 minutos, com um valor de 0,30 mg/min e a perda de massa acumulada total foi de 22,45 mg. Este ponto de 80 minutos apresentou a maior incerteza, com elevado valor absoluto e provavelmente corresponde à superação da incubação.

A taxa de erosão média na Fig. 6.10 tem o valor de 0,18 mg/min com uma correlação de 94%. A baixa correlação nesse ensaio está associada à incerteza elevada aos 80 minutos. Nos demais pontos, os valores de incerteza foram relativamente menores.

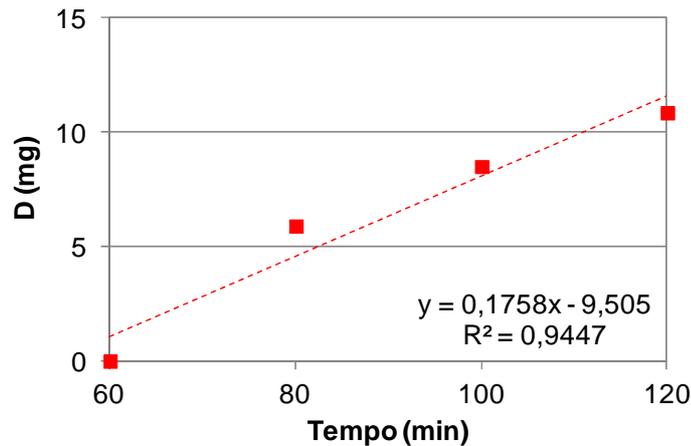


Figura 6.10 – Taxa de erosão para o teste DA5

A evolução da taxa de erosão e perda de massa acumulada para o teste DA6 estão na Tab. C.4 e Fig. 6.11.

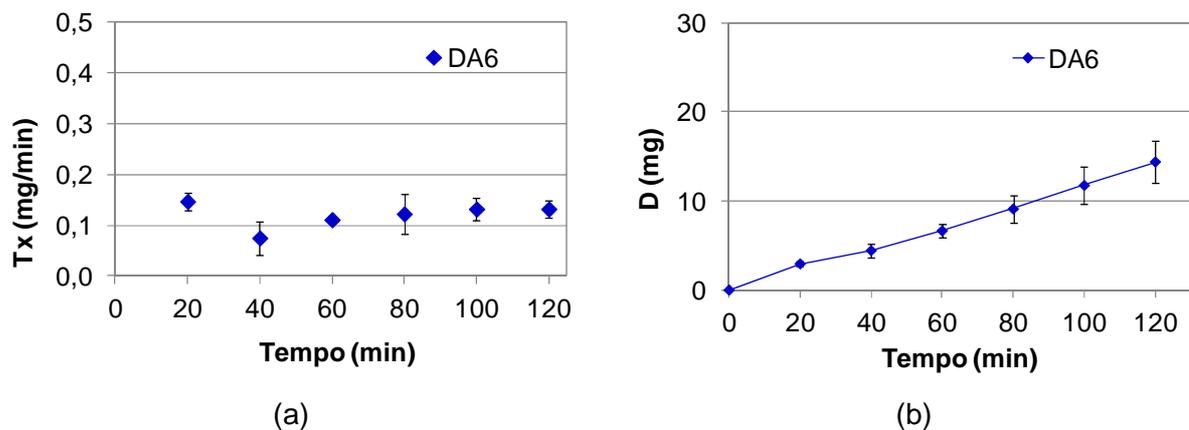


Figura 6.11 – Evolução de (a) taxa de erosão e (b) desgaste para o teste DA6

O ensaio DA6 apresentou uma taxa de erosão máxima de 0,15 mg/min aos 20 minutos, com perda de massa acumulada de 14,39 mg. Nota-se que o ponto de 20 minutos pode ser a superação da incubação, com valores absolutos baixos quando comparados aos demais ensaios como, por exemplo, DA5 na Fig. 6.9. A taxa de erosão média é apresentada na Fig. 6.12 com valor de 0,13 mg/min.

A adição de *Stellite 21* em DA6 novamente mostrou-se favorável à redução sensível no desgaste, de forma similar à tendência observada no MIG/MAG arame frio. Vale ressaltar que o teste AF4 com taxa de erosão de 0,28 mg/min é superior em aproximadamente 118% ao valor de 0,13 mg/min de DA6.

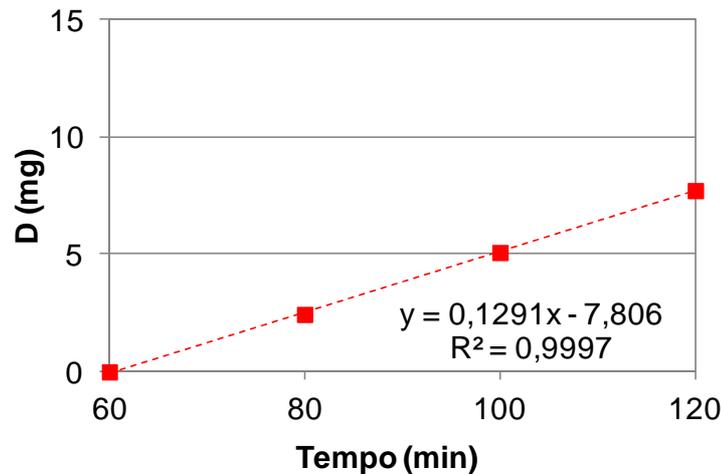


Figura 6.12 – Taxa de erosão para o teste DA6

Comparando os resultados obtidos para o ensaio DA1 em aço inoxidável austenítico (apresentados no Capítulo V), em condições idênticas de soldagem, com taxa de erosão de 0,13 mg/min, o ensaio DA6 apresentou valores levemente inferiores, da ordem de 0,13 mg/min. Para o teste DA5, a adição de *Stellite 6* não proporcionou um desempenho tão satisfatório, com uma taxa de erosão de 0,18 mg/min. Nsoesie et al. (2014) mostraram em sua pesquisa que a liga *Stellite 21* apresenta melhor desempenho, com baixa taxa de erosão, em relação a liga *Stellite 6* para a incidência normal.

6.2.3. Ensaio de Erosão em MIG/MAG duplo arame série

A evolução da taxa de erosão e perda de massa acumulada para o teste DS3 estão na Tab. C.5 e Fig. 6.13.

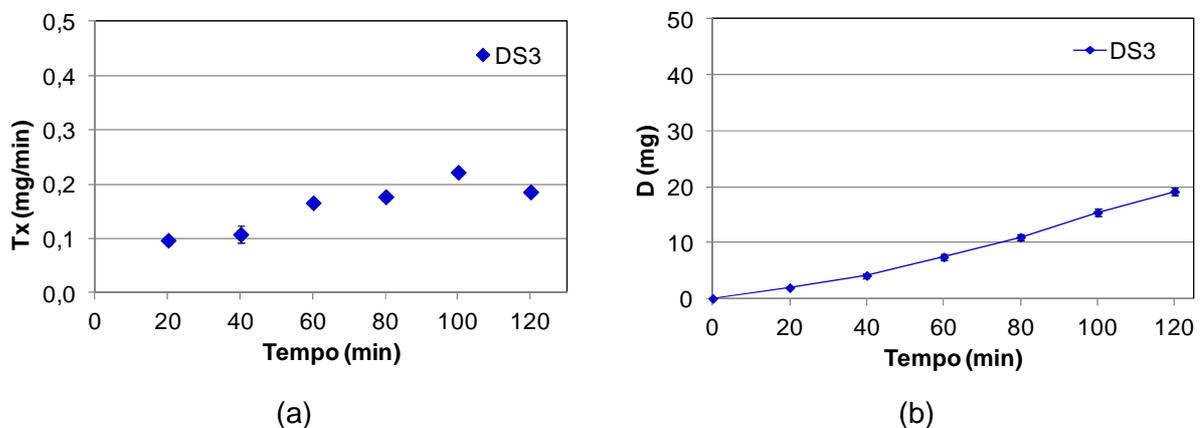


Figura 6.13 – Evolução de (a) taxa de erosão e (b) desgaste para o teste DS3

Neste caso, a incubação pode ter sido rompida aos 100 minutos, apresentando uma leve redução ao final do ensaio. A perda de massa acumulada total foi de 19,12 mg, ou seja, menor do que o obtido em DA5. A taxa de erosão média de DS3 está na Fig. 6.14 com valor obtido de 0,20 mg/min. Em DA5, ocorreu uma redução no valor de desgaste para 0,20 mg/min aos 120 minutos, influenciando no resultado da taxa de erosão da Fig. 6.14.

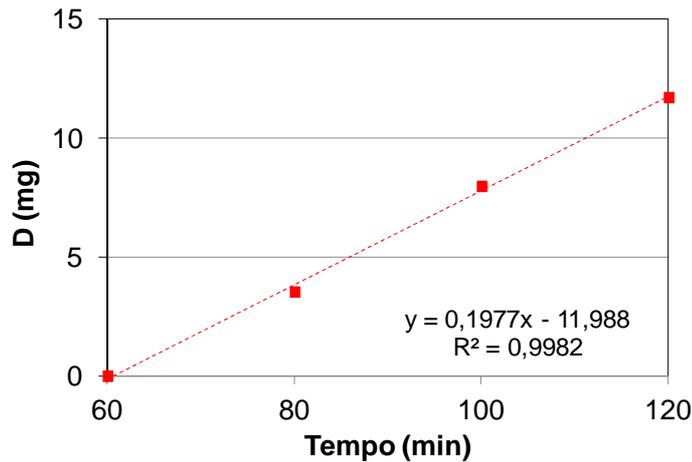


Figura 6.14 – Taxa de erosão para o teste DS3

De forma análoga, a Tab. C.6 apresenta os resultados para o ensaio DS4 e a Fig. 6.15 traz a evolução da perda de massa acumulada.

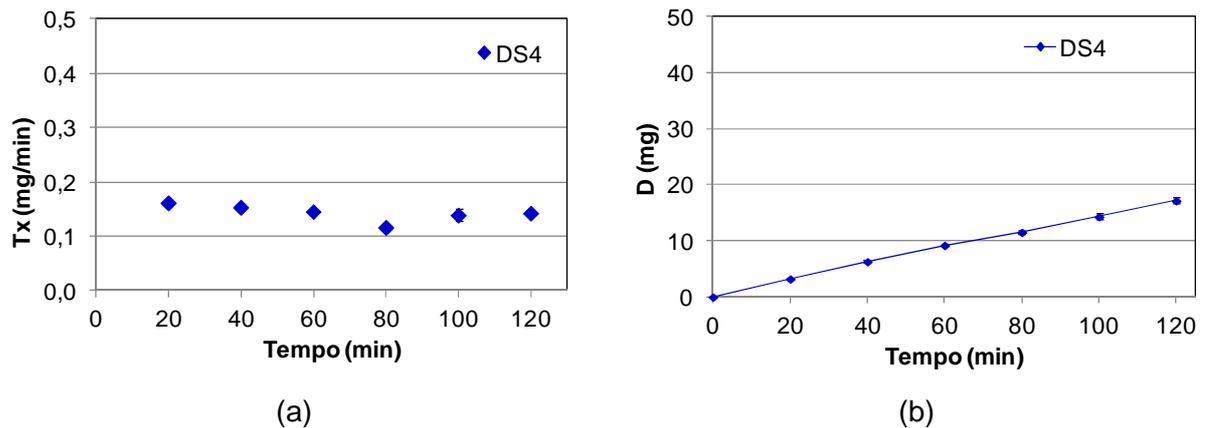


Figura 6.15 – Evolução de (a) taxa de erosão e (b) desgaste para o teste DS4

No ensaio DS4, os primeiros 20 minutos possuem a maior taxa de erosão com valor de 0,16 mg/min. Nota-se, de forma geral, que não houve grandes flutuações nos resultados, exceto para o valor reduzido de 0,12 mg/min aos 80 minutos.

A taxa de erosão média é apresentada na Fig. 6.16, com valor de 0,13 mg/min, sendo a menor observada para os ensaios em MIG/MAG duplo arame série com as misturas de arames de diferentes composições.

No processo MIG/MAG duplo arame série, a quantidade presente de aço inoxidável austenítico no arame mestre é levemente superior à liga de cobalto no arame escravo. Ambos os ensaios DS3 ($T_x = 0,20$ mg/min) e DS4 ($T_x = 0,13$ mg/min) apresentaram taxa de erosão muito inferiores à DS1 ($T_x = 0,37$ mg/min) obtido com parâmetros iguais de soldagem, apresentada no capítulo V.

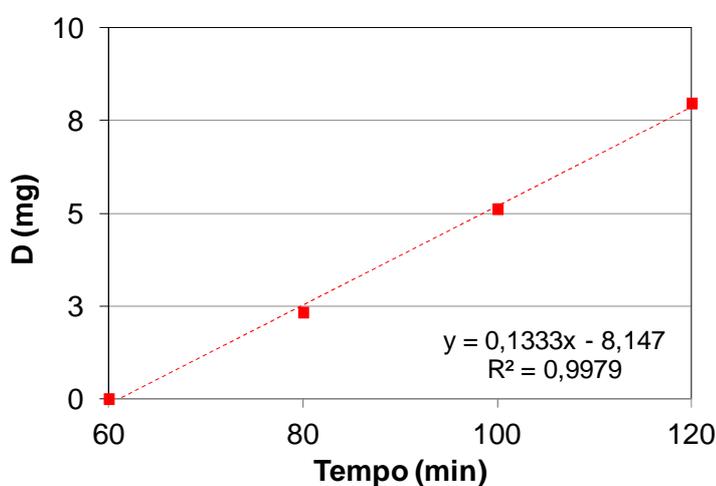


Figura 6.16 – Taxa de desgaste para o teste DS4

A taxa de erosão de DS1 é 89% superior à DS3 e 180% maior quando comparado com DS4. Para o processo MIG/MAG duplo arame série, as duas ligas de cobalto apresentaram-se vantajosas na redução da taxa de erosão, sendo novamente o destaque para a baixa taxa de erosão de DS4 ao utilizar o *Stellite 21*.

Fica evidente também que todas as taxas de erosão para o processo MIG/MAG duplo arame, seja na forma série ou paralelo, são menores do que o processo MIG/MAG arame frio. Vale lembrar que a quantidade proporcional das ligas de cobalto e a energia de soldagem para o MIG/MAG duplo arame são superiores, sendo este o principal fator responsável pela redução no desgaste.

6.2.4. Análise Geral dos Ensaios de Erosão

A Tabela 6.11 apresenta os valores de taxa de erosão e perda de massa acumulada para as 2 horas de erosão e nos períodos avaliados após a incubação para os ensaios realizados com mistura de aço inoxidável austenítico e ligas de cobalto.

Tabela 6.11 – Valores obtidos de perda de massa acumulada total (D), perda de massa acumulada entre 1 e 2 horas (D_{1-2h}) e taxa de erosão entre 1 e 2 horas (Tx_{1-2h})

Amostra	AF3	AF4	DA5	DA6	DS3	DS4
Eletrodo	308+6Co	308+21Co	308+6Co	308+21Co	308+6Co	308+21Co
Dil (%)	16,72	16,62	35,98	37,19	45,63	34,47
D (mg)	43,21	31,09	22,45	14,39	19,12	17,17
D_{1-2h} (mg)	21,82	16,59	10,85	7,73	11,70	7,96
Tx_{1-2h} (mg/min)	0,36	0,28	0,18	0,13	0,20	0,13

De forma geral, nota-se que a presença da liga de cobalto *Stellite 21* influencia mais satisfatoriamente na redução da perda de massa acumulada. Isto porque, comparativamente, os valores de taxa de erosão e perda de massa acumulada são menores ao usar este material para todos os processos de soldagem.

Os corpos de prova que foram soldados com MIG/MAG duplo arame paralelo possuem velocidade de alimentação iguais em ambos os arames, conseqüentemente a adição de metal ocorre em quantidades similares, sendo que os resultados de DA5 e DA6 são os melhores obtidos para as combinações propostas.

Nota-se que, de forma geral, a perda de massa acumulada e a taxa de erosão possuem os maiores valores para os ensaios em MIG/MAG arame frio (AF3 e AF4). A adição de ligas de cobalto provavelmente influenciou na redução da perda de massa somente no ensaio AF4, pois AF3 está em um nível idêntico ao dos testes anteriores.

A Figura 6.17 apresenta a evolução da taxa de erosão ao longo dos ensaios realizados. Nota-se uma taxa de erosão superior em todos os momentos para o processo MIG/MAG arame frio (AF3 e AF4). Este desempenho é similar se comparado com os resultados em aço inoxidável austenítico de AF1 e AF2 com os demais processos de soldagem. Para o ensaio DA6 e DS4 os valores foram praticamente constantes e inferiores aos resultados para os demais ensaios. Novamente, fica evidente o melhor desempenho para a mistura em aço inoxidável austenítico com a liga de cobalto *Stellite 21*.

Nsoesie et al. (2014) perceberam na análise experimental de *Stellite 21*, uma redução de 15% na taxa de erosão em relação ao *Stellite 6*. Nos resultados da Tab. 6.17, a taxa de erosão com presença de *Stellite 6* é menor em 27% para o MIG/MAG arame frio (ao comparar AF4 e AF3), 36% para o MIG/MAG duplo arame paralelo (DA6 em relação a DA5) e 48% para o MIG/MAG duplo arame série (DS4 e DS3).

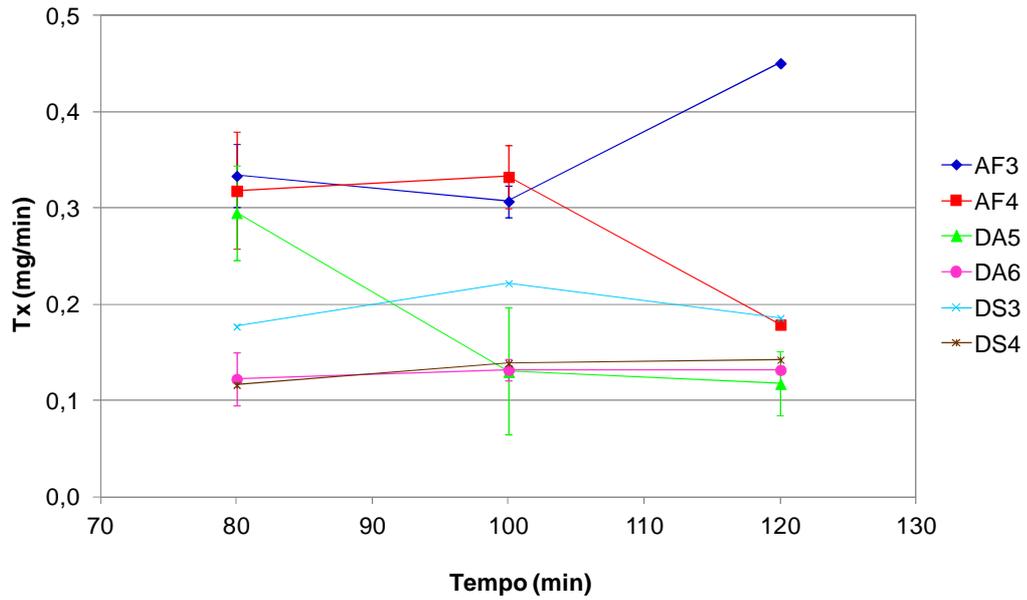


Figura 6.17 – Taxa de erosão para os ensaios de erosão

A Figura 6.18 apresenta os resultados para a perda de massa acumulada no intervalo de 1 a 2 horas.

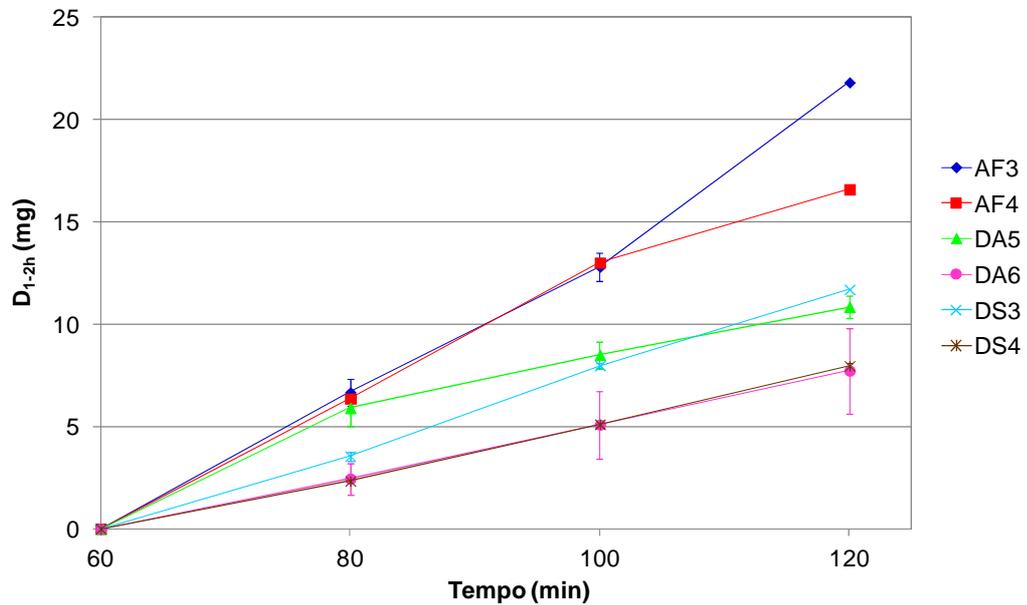


Figura 6.18 – Evolução da perda de massa acumulada para os ensaios de erosão

Nota-se que os ensaios DA6 e DS4 com adição de cobalto *Stellite 21* possuem as menores perdas de massa acumulada. Comparando DA5/DS3 e DA6/DS4, a presença de maior quantidade das ligas de cobalto adicionadas no processo MIG/MAG duplo arame paralelo atua positivamente na redução do desgaste.

Nsoesie et al. (2014) atribuíram o melhor desempenho do *Stellite 21* em relação à erosão com incidência normal a sua maior dureza. Os carbonetos intermetálicos formados na liga *Stellite 21* têm dureza compatível com materiais ricos em carbonetos de Cr.

6.3. Análise de dureza na seção transversal da amostra de erosão

A Figura 6.19 apresenta a dureza na seção do corpo de prova AF3 a partir da superfície erodida (ponto zero) e o mapeamento da região endurecida está na Fig. 6.20.

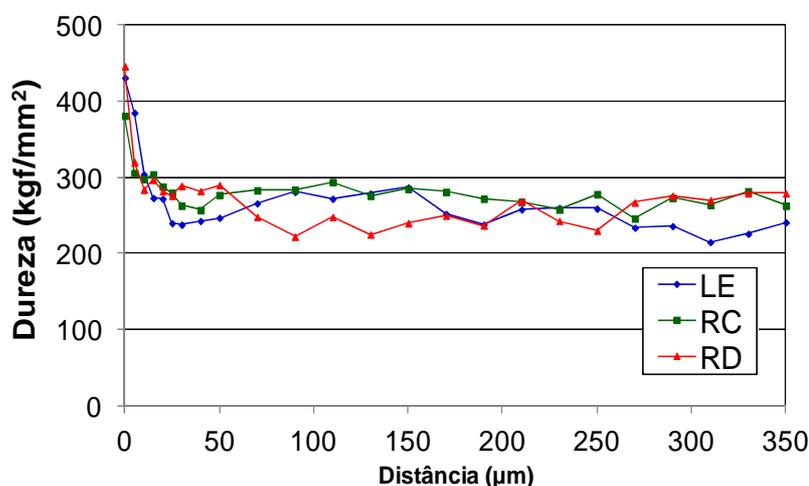


Figura 6.19 - Dureza ao longo da seção transversal do corpo de prova AF3

A camada endurecida na Fig. 6.20 possui uma região com pontos de dureza entre 450 e 500 kgf/mm² em várias posições do corpo de prova, incluindo o centro. Este é um indício de que o corpo de prova recebeu uma ação homogênea das partículas em sua superfície durante a erosão. Com esta hipótese, justifica-se uma maior perda de massa para o corpo de prova AF3. A dureza da superfície endurecida é superior à AF1 e AF2 (ver Tab. 5.23 e 5.24), provavelmente afetada pela adição de cobalto, tendo em vista que o substrato de AF3 também apresenta um valor superior de dureza.

A camada endurecida está na Tab. 6.12, com valor médio de 8 µm, sendo indicado o lado esquerdo (LE), região central (RC) e lado direito (LD). Os valores são representados através da média (M) e desvio padrão (DP).

De forma geral, a espessura da camada endurecida está em conformidade com a obtida para AF1 e AF2. O ganho de dureza de 63% é superior aos valores obtidos para AF1 e AF2, apontando que este corpo de prova (AF3) tem um desgaste elevado até atingir um aumento significativo de resistência na superfície.

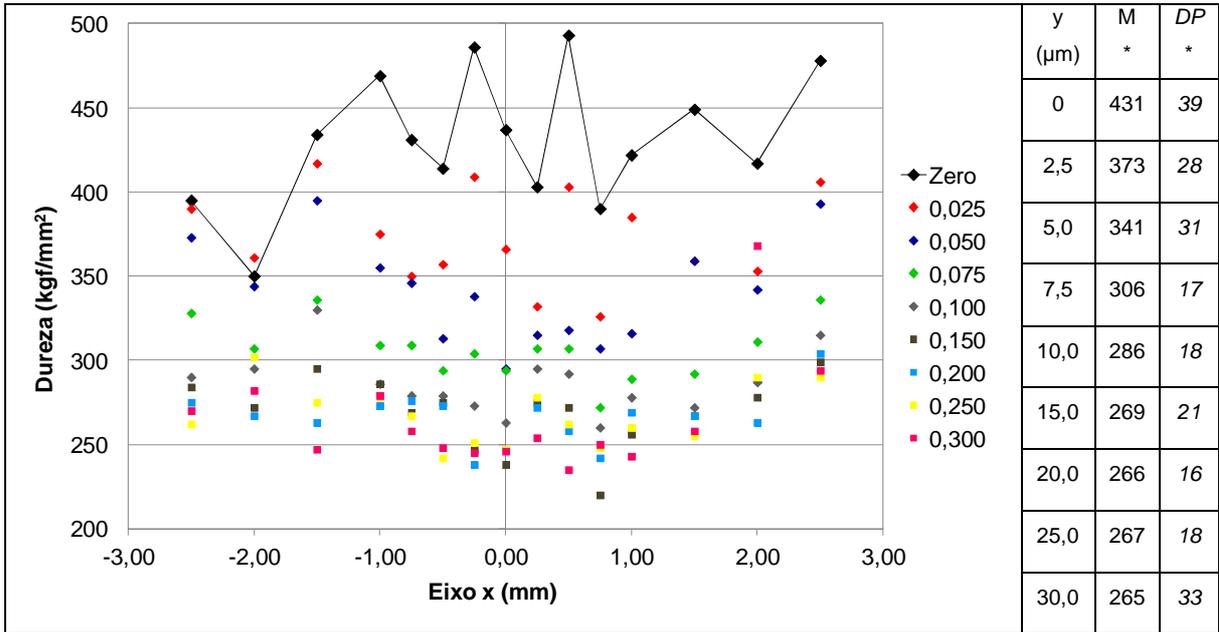


Figura 6.20 – Mapeamento de dureza no corpo de prova AF3. *kgf/mm²

Tabela 6.12 – Limites de dureza na camada endurecida e substrato para a amostra AF3

Item	LE	RC	LD	M	DP
H _{LIM} (kgf/mm ²)	315	332	295	314	19
H _{sub} (kgf/mm ²)	265	282	245	264	19
ECE (μm)	10	5	10	8	3

A Figura 6.21 apresenta a dureza na seção transversal de AF4 e a Fig. 6.22 à camada endurecida. Neste ensaio, a camada endurecida possui uma variabilidade maior na faixa de 400 a 500 kgf/mm². Entretanto, os valores médios da camada endurecida estão próximos à AF3. Nota-se também a existência de pontos de alto endurecimento tanto em regiões centrais como nas laterais apontando para uma distribuição homogênea de impactos de partículas em toda a face do corpo de prova.

Na Tabela 6.13, é definida a região endurecida e sua espessura. A camada endurecida possui uma espessura semelhante aos demais corpos de prova do processo MIG/MAG arame frio.

O ganho de dureza de 55% em relação ao substrato está dentro dos valores obtidos para o processo MIG/MAG arame frio. Isto reforça que o substrato mais duro favorece a uma menor perda de massa, porque a superfície atinge um valor de dureza superior em um intervalo de tempo menor de ensaio.

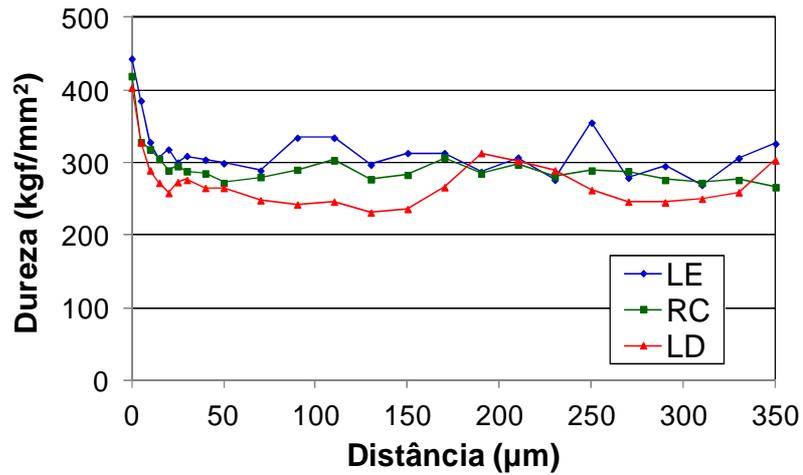


Figura 6.21 - Dureza ao longo da seção transversal do corpo de prova AF4

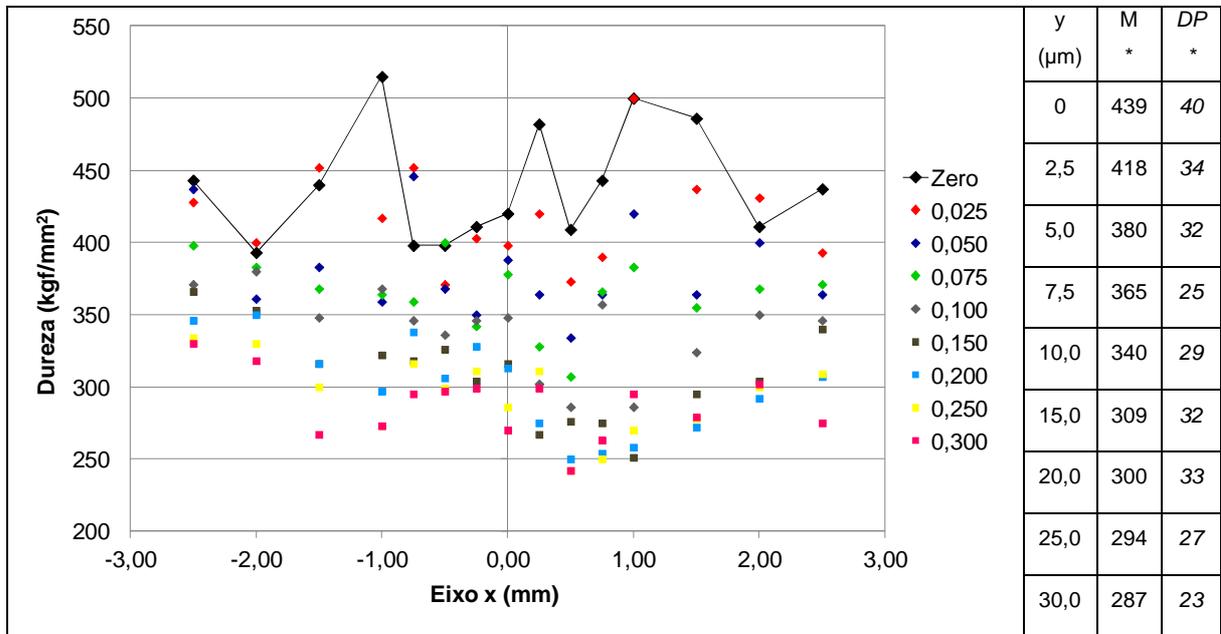


Figura 6.22 – Mapeamento de dureza no corpo de prova AF4. * kgf/mm²

Tabela 6.13 – Limites de dureza na camada endurecida e substrato para a amostra AF4

Item	LE	RC	LD	Média	DP
H _{LIM} (kgf/mm ²)	358	337	306	334	26
H _{sub} (kgf/mm ²)	308	287	256	284	26
ECE (µm)	10	5	10	8	3

Este fato foi observado por Desale et al. (2009) para o aço inoxidável e o Inconel, no qual a influência da dureza do revestimento sobre o desgaste. Desale et al. (2009) observaram, ao usar um material em aço inoxidável austenítico, que o desgaste reduziu com

o endurecimento, enquanto o Inconel não alterou sua dureza e continuou aumentando sua perda de massa.

A Figura 6.23 apresenta a dureza na seção transversal do teste DA5 (mistura de arame 308LSi e *Stellite 6*), com mapeamento da região endurecida na Fig. 6.24.

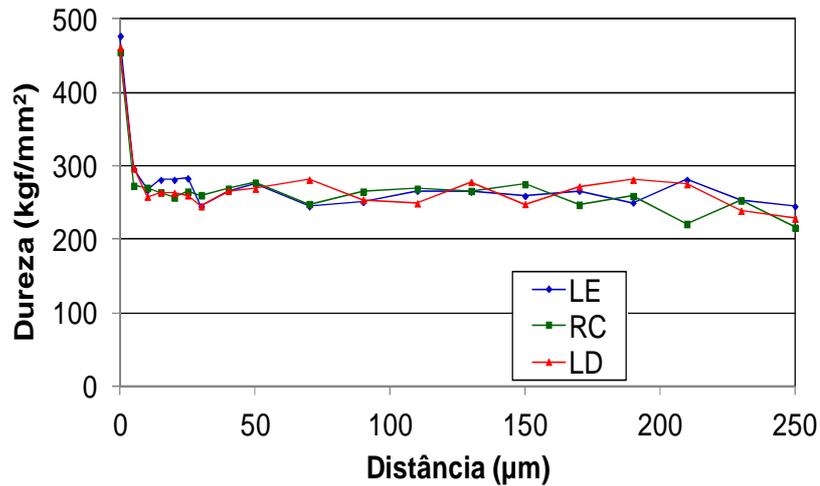


Figura 6.23 – Dureza ao longo da seção transversal do corpo de prova DA5

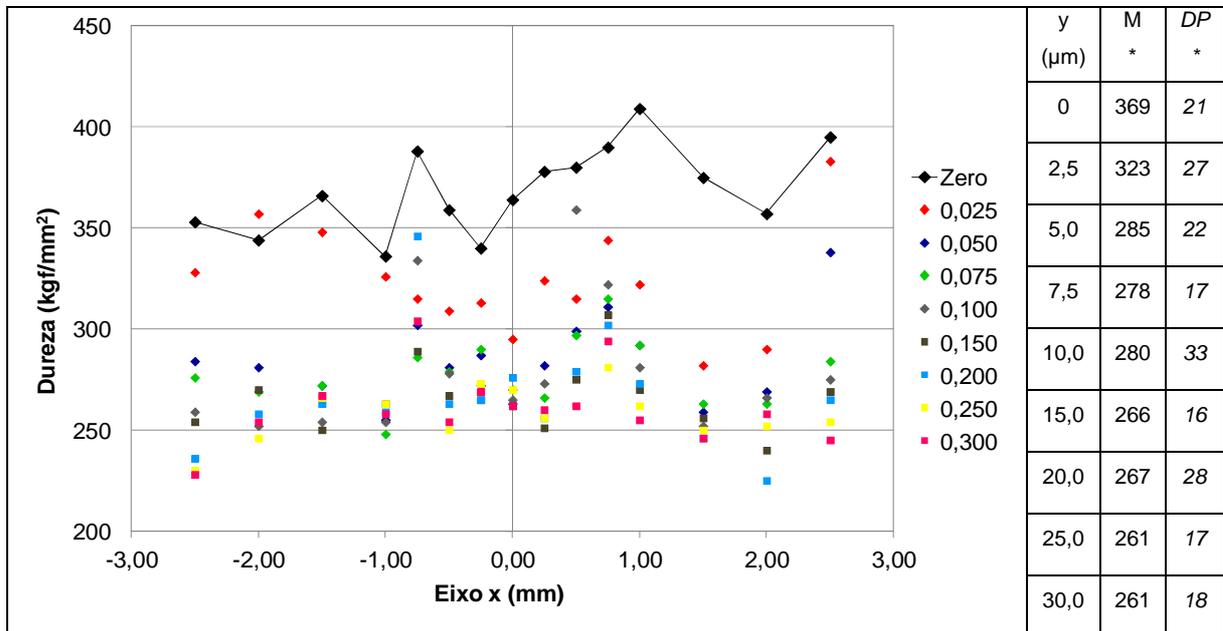


Figura 6.24 – Mapeamento de dureza no corpo de prova DA5. * kgf/mm²

A camada endurecida para o teste DA5 em termos de valores médios está mostrada na Tab. 6.14. O aumento na dureza em relação ao substrato é de 40%, ou seja, cresceu de 263 para 369 kgf/mm².

Tabela 6.14 – Limites de dureza na camada endurecida e substrato para a amostra DA5

Item	LE	RC	LD	Média	DP
H_{LIM} (kgf/mm ²)	310	313	317	313	4
H_{sub} (kgf/mm ²)	260	263	267	263	4
ECE (μm)	2,5	2,5	2,5	2,5	0

Um ponto importante é que esta amostra possui uma camada endurecida de dureza menor do que AF3 e AF4, porém com uma maior homogeneidade, de acordo com o desvio padrão da Fig. 6.24. Isto é um indício que, apesar de não possuir um valor superior aos demais ensaios, a presença de uma camada endurecida uniforme ajuda a reduzir, de forma sensível, a perda de massa durante a erosão.

Para o ensaio DA6, a camada endurecida atingiu valores acima de 394 kgf/mm², conforme Fig. 6.25 e 6.26.

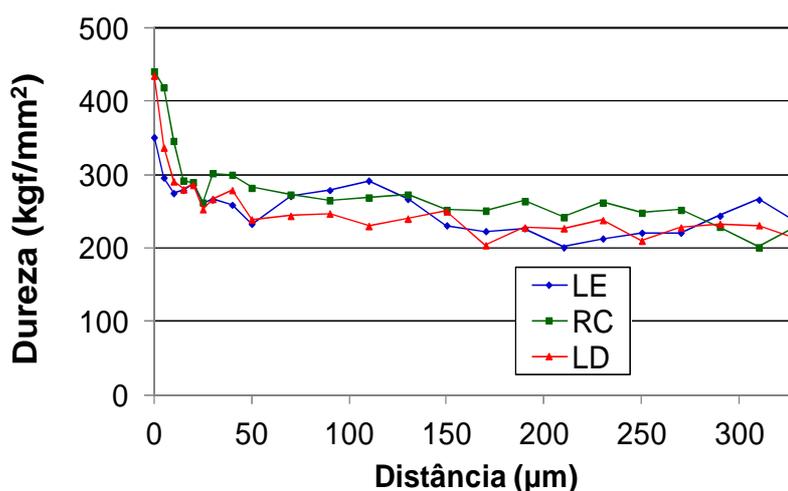


Figura 6.25 – Dureza ao longo da seção transversal do corpo de prova DA6

Na Tabela 6.15, é apresentada a determinação da camada endurecida, sendo notável um endurecimento profundo nas laterais do corpo de prova. A média de ECE = 16 μm está acima dos valores das demais amostras avaliadas. Este ensaio apresentou uma elevada variação de dureza entre a superfície erodida e substrato de 394 para 251 kgf/mm², ou seja, os valores de dureza aumentaram na ordem de 56%.

Esta camada endurecida, apesar de ser de grande dureza em termos de valores médios, possui uma grande flutuação de valores com a região do lado esquerdo na Fig. 6.26 acima de 400 kgf/mm².

Tabela 6.15 – Limites de dureza na camada endurecida e substrato para a amostra DA6

Item	LE	RC	LD	Média	DP
H _{LIM} (kgf/mm ²)	303	316	285	301	16
H _{sub} (kgf/mm ²)	253	266	235	251	16
ECE (µm)	15	2,5	30	16	14

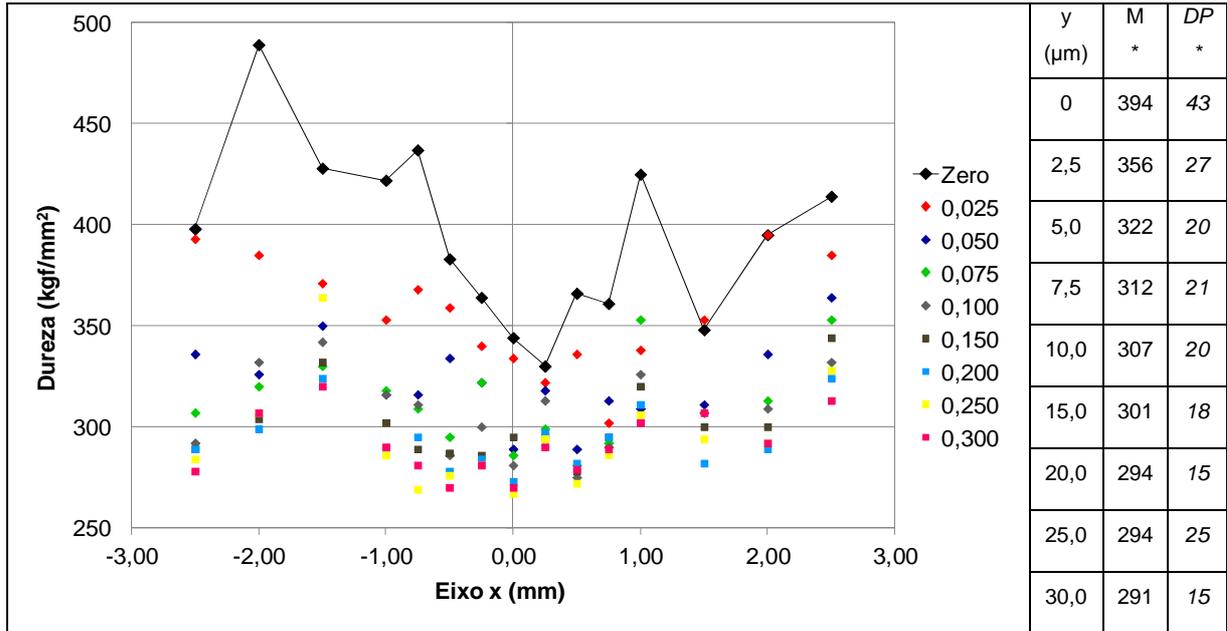


Figura 6.26 – Mapeamento de dureza no corpo de prova DA6. * kgf/mm²

Isto é uma evidência de que pode ter sido retirada uma amostra metalurgicamente heterogênea. Uma hipótese é de que a região central da amostra possui presença de aço inoxidável austenítico e, nas laterais, ocorreu uma maior concentração de liga de cobalto, devido à disposição em paralelo dos arames. Com isso, a variação de dureza foi elevada, bem como o desgaste ocorreu em uma região específica do corpo de prova.

A dureza alcançada na camada endurecida para DA6 é levemente superior à DA5 em torno de 7%. Ao contrário, o substrato de DA5 possui uma dureza levemente superior à DA6 em termos de valores médios em torno de 3,5%. Vale lembrar que a taxa de erosão de DA5, foi 36% superior à de DA6, indicando a forte influência da camada endurecida sobre o desgaste em incidência normal.

Para o corpo de prova DS3, a dureza na seção transversal é apresentada na Fig. 6.27 e a camada endurecida está na Fig. 6.28. Nota-se que a dureza no ensaio DS3 é superior aos valores obtidos para o processo MIG/MAG duplo arame paralelo. A região central na Fig. 6.28 possui uma boa homogeneidade na sua dureza, porém as laterais apresentaram valores inferiores.

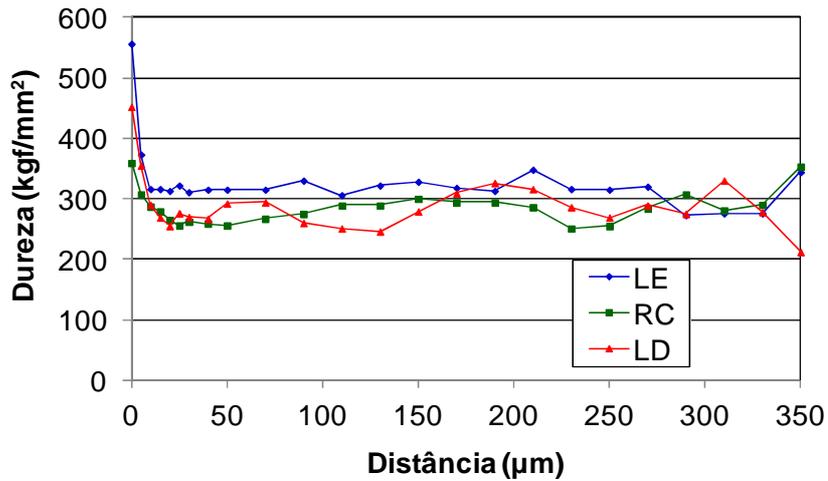


Figura 6.27 – Dureza ao longo da seção transversal do corpo de prova DS3

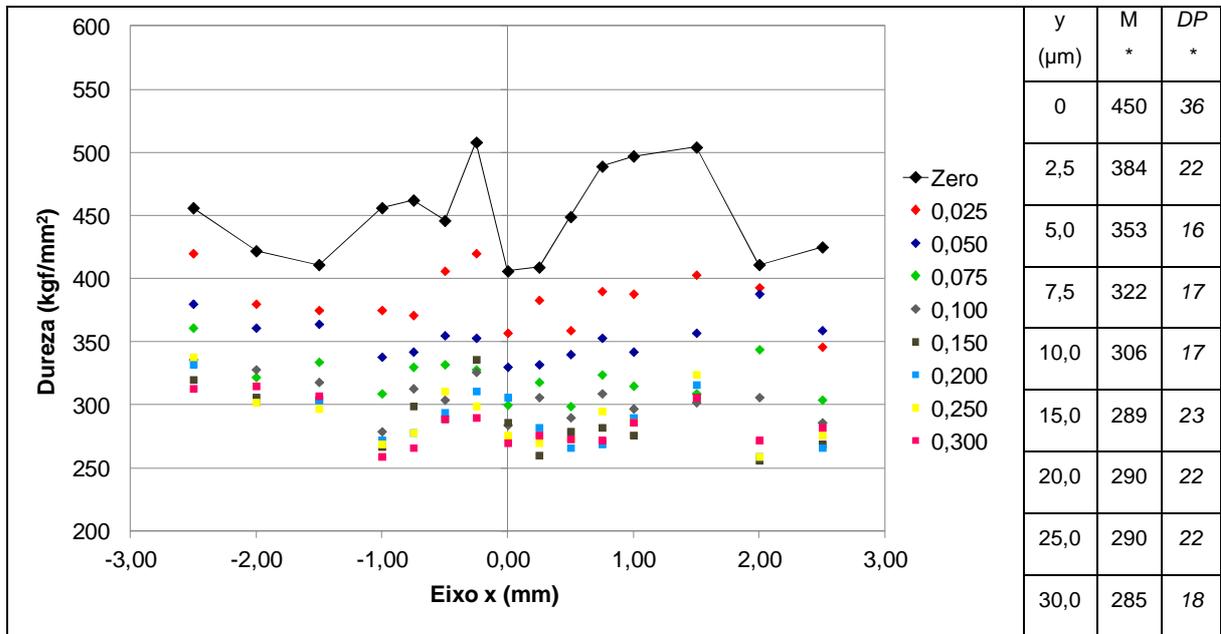


Figura 6.28 – Mapeamento de dureza no corpo de prova DS3. * kgf/mm²

O ganho de dureza na camada endurecida de DS3 de 52% está acima do valor obtido com o ensaio DA5. Na Figura 6.28, o lado direito aparentemente resistiu de uma forma superior ao desgaste devido a sua maior dureza superficial.

Esta particularidade exibida pelo ensaio DS3 torna novamente forte a evidência de que uma camada endurecida uniforme, mesmo que em valores absolutos inferiores, pode ser uma vantagem na resistência à erosão. O fato é comprovado pelo corpo de prova DA5 que tem uma camada endurecida de 369 kgf/mm² com taxa de erosão de 0,18 mg/min, enquanto DS3 tem 450 kgf/mm² e 0,20 mg/min.

A Tabela 6.16 apresenta a espessura da camada endurecida de 8 μm para o ensaio DS3.

Tabela 6.16 – Limites de dureza na camada endurecida e substrato para a amostra DS3

Item	LE	RC	LD	Média	DP
H_{LIM} (kgf/mm ²)	368	333	332	345	21
H_{sub} (kgf/mm ²)	318	283	282	295	21
ECE (μm)	10	5	10	8	3

A Figura 6.29 apresenta a dureza na seção transversal do ensaio DS4. A presença do metal de base é notada na amostra ao avaliar a região lateral (LE e LD na Fig. 6.29), devido ao perfil de penetração do processo MIG/MAG duplo arame série.

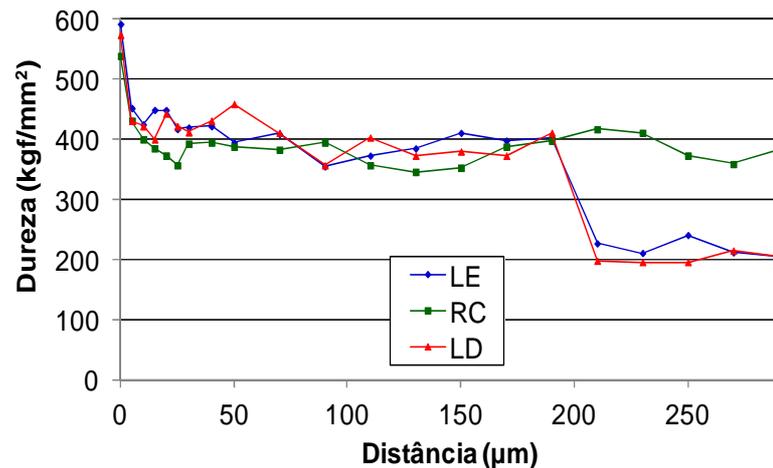


Figura 6.29 – Dureza ao longo da seção transversal do corpo de prova DS4

A camada endurecida na Fig. 6.30 para o ensaio DS4 apresentou um valor elevado de dureza da ordem de 532 kgf/mm². Na Tabela 6.17, é apresentada a espessura da camada endurecida. O substrato desta amostra também possui um valor superior de dureza na ordem de 388 kgf/mm².

A elevada dureza do substrato pode ter favorecido a obtenção de uma resistência maior ao desgaste e a formação de camada endurecida muito dura. O ganho de 37% na dureza reforça este fato, sendo que a camada endurecida também manteve na faixa de 8 μm .

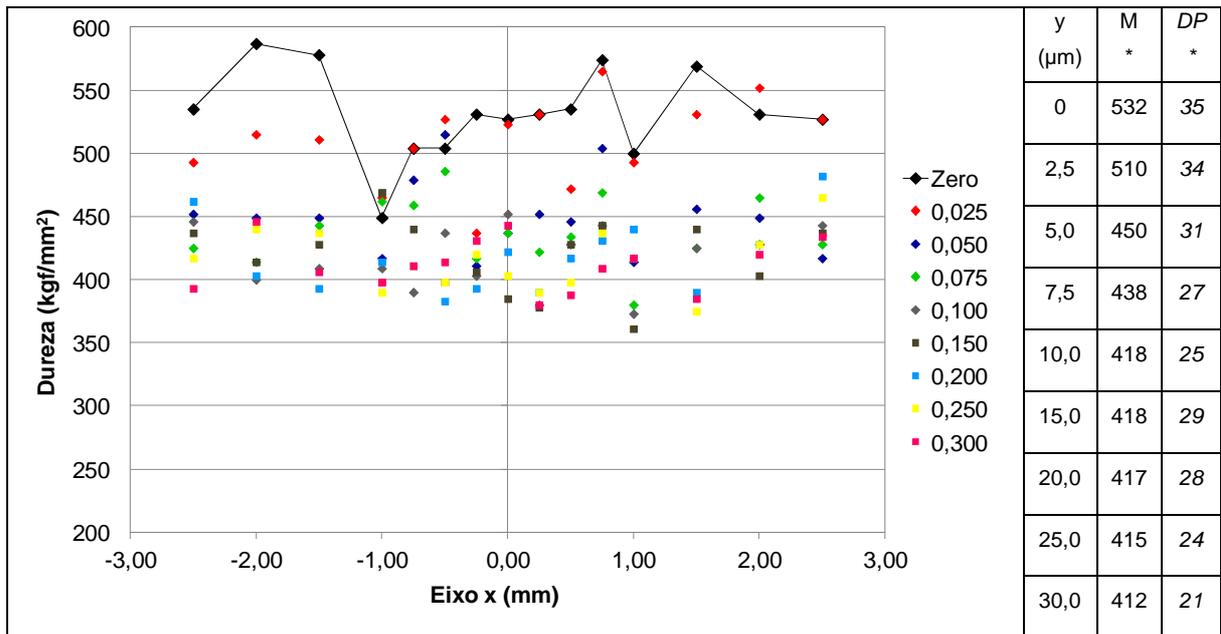


Figura 6.30 – Mapeamento de dureza no corpo de prova DS4. * kgf/mm²

Tabela 6.17 – Limites de dureza na camada endurecida e substrato para a amostra DS4

Item	LE	RC	LD	Média	DP
H _{LIM} (kgf/mm ²)	441	426	446	438	10
H _{sub} (kgf/mm ²)	391	376	396	388	10
ECE (μm)	10	5	10	8	3

As amostras DS3 e DS4 possuem um comportamento similar ao encontrado no MIG/MAG duplo arame paralelo. A dureza da superfície de DS3 após a erosão é de 532 kgf/mm², enquanto DS4 é de 450 kgf/mm², ou seja, 18% superior. A taxa de erosão de DS4 é 48% superior à DS3, indicando novamente que um aumento pronunciado de dureza pode influenciar exponencialmente a queda no desgaste.

6.3.1. Análise Geral dos Resultados de Dureza nas Amostras Erodidas

A Tabela 6.18 apresenta os valores em termos de dureza e parâmetros de erosão para todos os ensaios realizados.

A Figura 6.31 apresenta a comparação em termos de dureza da camada endurecida (H_{sup}) e substrato (H_{sub}) entres as amostras.

De forma geral, as amostras com adição de *Stellite 21* apresentaram durezas superiores na camada endurecida para o mesmo processo de soldagem após a erosão, proporcionando uma redução na perda de massa acumulada. Tal constatação é válida para AF4, DA6 e DS4, na Fig. 6.31. O fato de DA6 possuir uma dureza inferior na camada

endurecida em relação à AF4 e, mesmo assim, apresentar uma taxa de erosão menor demonstra que é fundamental a obtenção de uma camada endurecida espessa e homogênea na superfície para gerar um aumento na resistência ao desgaste. A camada endurecida mais espessa e homogênea em DA6 provavelmente é resultado da maior adição de *Stellite 21* no processo MIG/MAG duplo arame paralelo em comparação ao MIG/MAG arame frio.

Tabela 6.18 – Valores de dureza, taxa de erosão e perda de massa acumulada para as misturas de aço inoxidável austenítico e ligas de cobalto

CS	H _{sup} (kgf/mm ²)	H _{sub} (kgf/mm ²)	G (%)	Tx (mg/min)	D (mg)	D _{1-2h} (mg)
AF3	431	264	63	0,36	43,21	21,82
AF4	439	284	55	0,28	31,09	16,59
DA5	369	263	40	0,18	22,45	10,85
DA6	394	251	56	0,13	14,39	7,73
DS3	450	295	52	0,20	19,12	11,70
DS4	532	396	37	0,13	17,17	7,96

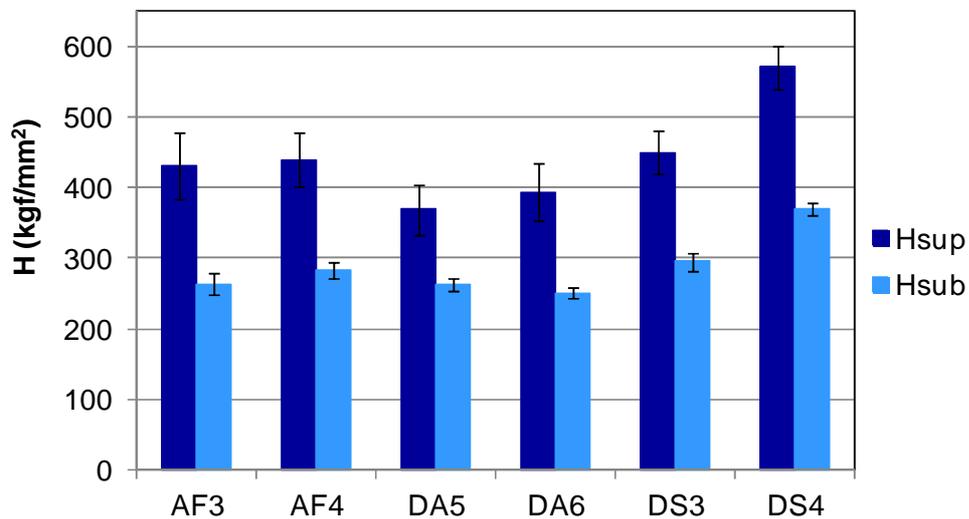


Figura 6.31 – Dureza superficial após erosão e dureza do substrato

A Figura 6.32 apresenta uma avaliação em termos de ganho de dureza (G). O ganho de dureza aparentemente foi superior em AF3 acima de 60%, enquanto o menor valor observado é para DA5. Os demais valores permanecem em torno de 50%, não sendo

evidente que o ganho (G) seja o fator fundamental para a redução no desgaste e sim os valores absolutos da camada endurecida e sua homogeneidade.



Figura 6.32 – Ganho de dureza (G) da camada endurecida em relação ao substrato

6.4. Análise das características topográficas das amostras de erosão

Nesta etapa, caracterizou-se a morfologia da superfície após a erosão, procurando entender a cinética do processo erosivo, bem como determinar seus parâmetros topográficos.

Para as amostras soldadas pelo processo MIG/MAG arame frio, os resultados em termos de topografia são apresentados na Fig. 6.33, iniciando com o corpo de prova AF3 com mistura usando a liga *Stellite 6*.

Analisando o diagrama de nível (Fig. 6.33 c), nota-se a presença de pontos isolados de vales profundos que provavelmente refletiram nos parâmetros de rugosidade. Os picos apresentam-se de forma agrupada, como ocorre nas regiões em vermelho na Fig. 6.33 (b).

A Figura 6.34 apresenta o perfil de rugosidade na região central de medição para a direção leste-oeste e norte-sul.

A Tabela 6.19 apresenta os parâmetros de rugosidade para a amostra AF3. Para S_a e S_q , os valores estão próximos aos obtidos para a soldagem em aço inoxidável austenítico. O valor elevado de S_t indica a presença de picos e vales isolados de grande amplitude. Comparando com o valor de R_t leste-oeste e norte-sul, nota-se uma redução da ordem de 30 a 40% em relação à S_t . O valor de S_{sk} negativo aponta a presença de um perfil do tipo

platô, enquanto o valor S_{ku} maior do que 3 sinaliza uma centralização da distribuição, isto é, o tamanho dos diversos picos ou vales apresentam valores próximos da média.

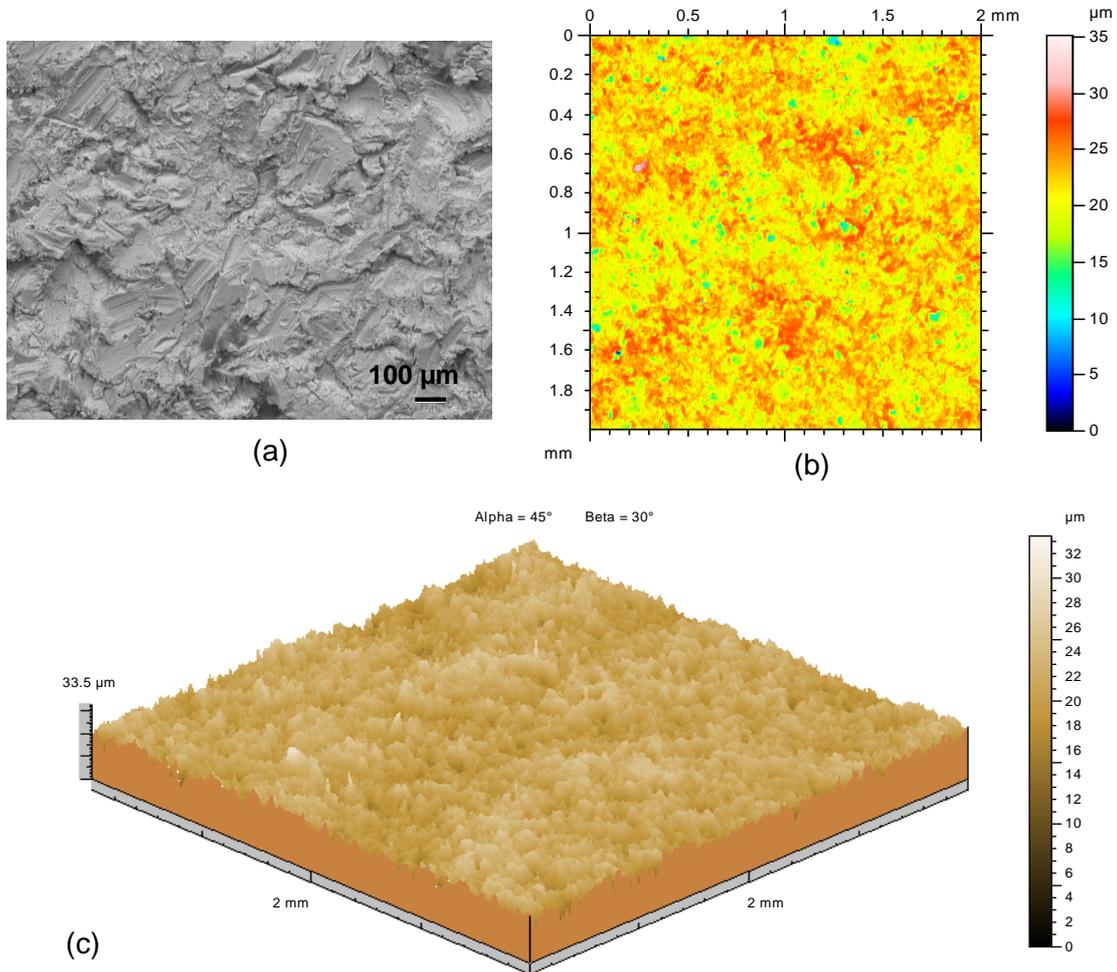


Figura 6.33 – Topografia AF3, (a) MEV, (b) diagrama de nível (c) topografia tridimensional

Tabela 6.19 – Valores de rugosidade para amostra AF3 erodida, parâmetros em μm

Local	Sa	Sq	St	Ssk	Sku	Figura
A _{Erod}	1,910	2,460	35,200	-0,399	4,210	6.33

Na Figura 6.35, é apresentado o aspecto topográfico da amostra AF4. O diagrama de nível (Fig. 6.35 b) indica que existem picos e vales isolados na amostra. Isso é perceptível também na Fig. 6.35 (c).

A Figura 6.36 apresenta o perfil de rugosidade na região central de medição para a direção leste-oeste e norte-sul da amostra AF4. Na Tabela 6.20, têm-se os parâmetros de rugosidade para a amostra AF4. Os valores de Sa e Sq de AF4 são similares aos encontrados em AF3.

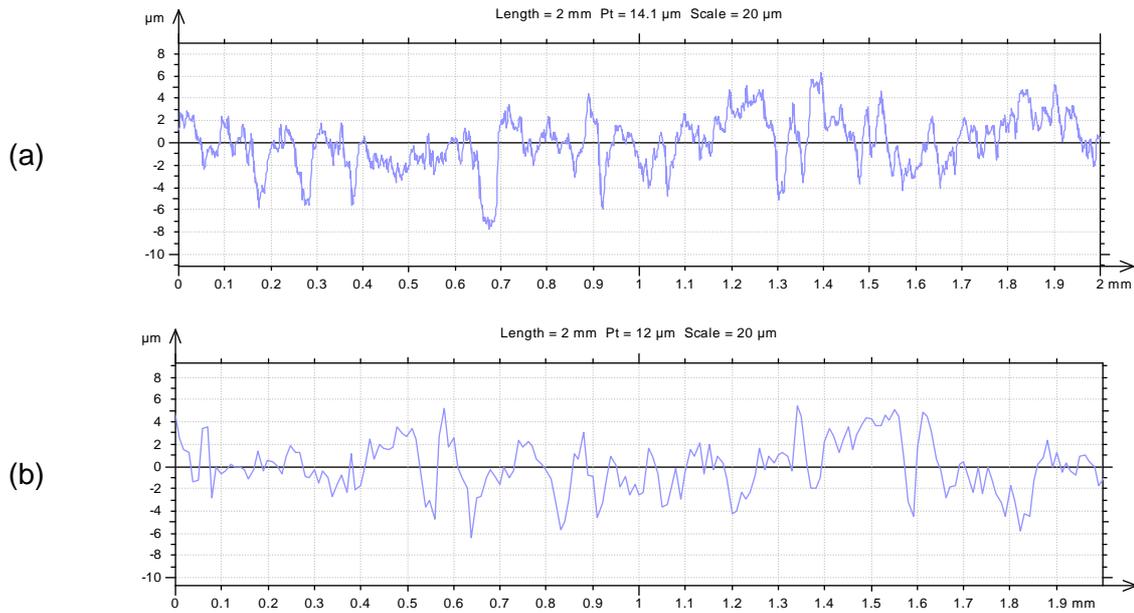


Figura 6.34 – Perfil de rugosidade da amostra AF3, (a) leste oeste e (b) norte sul

Tabela 6.20 – Valores de rugosidade para amostra AF4 erodida, parâmetros em μm

Local	Sa	Sq	St	Ssk	Sku	Figura
A_{Erod}	1,940	2,580	40,500	-0,234	6,070	6.35

O fato dos parâmetros serem levemente superiores em relação à AF3 está relacionado à sua maior amplitude de picos e vales, provavelmente em menor frequência. Com isso, o parâmetro St é elevado, com o perfil do tipo platô (Ssk negativo) e uma característica de distribuição normal ($Sku > 3$).

Como a perda de massa acumulada de AF3 é superior à AF4, isto pode indicar que o elevado desgaste tende a tornar o perfil achatado, com menor frequência de picos e vales isolados e de grande amplitude.

Para o ensaio DA5, os resultados em termos de rugosidade são apresentados na Fig. 6.37. Na Fig. 6.37 (b), o diagrama de nível indica a presença de picos e vales bem distribuídos em áreas pequenas.

A Figura 6.38 apresenta o perfil de rugosidade na região central de medição para a direção leste-oeste e norte-sul da amostra DA5. A Tabela 6.21 apresenta os parâmetros de rugosidade para a amostra DA5.

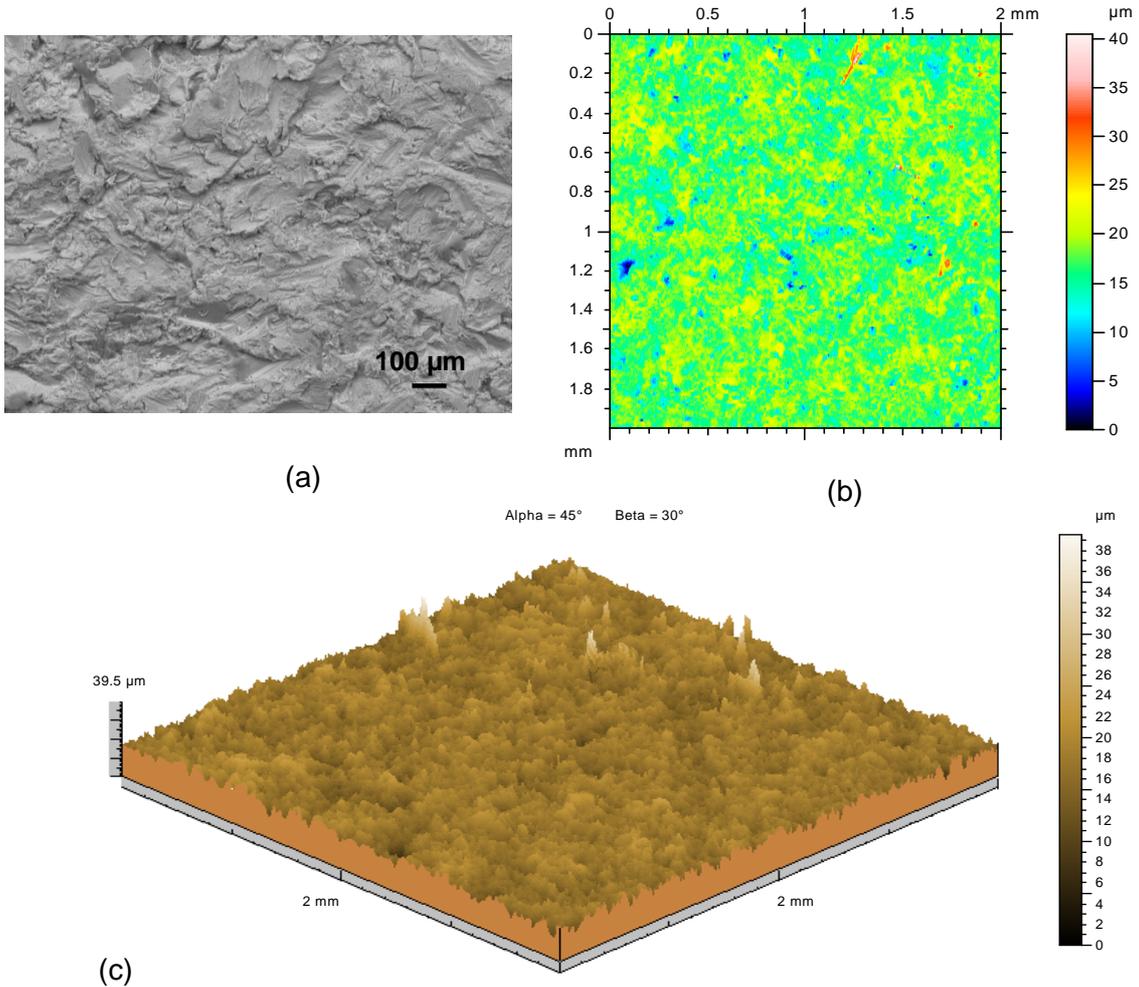


Figura 6.35 – Topografia AF4, (a) MEV, (b) diagrama de nível (c) topografia tridimensional

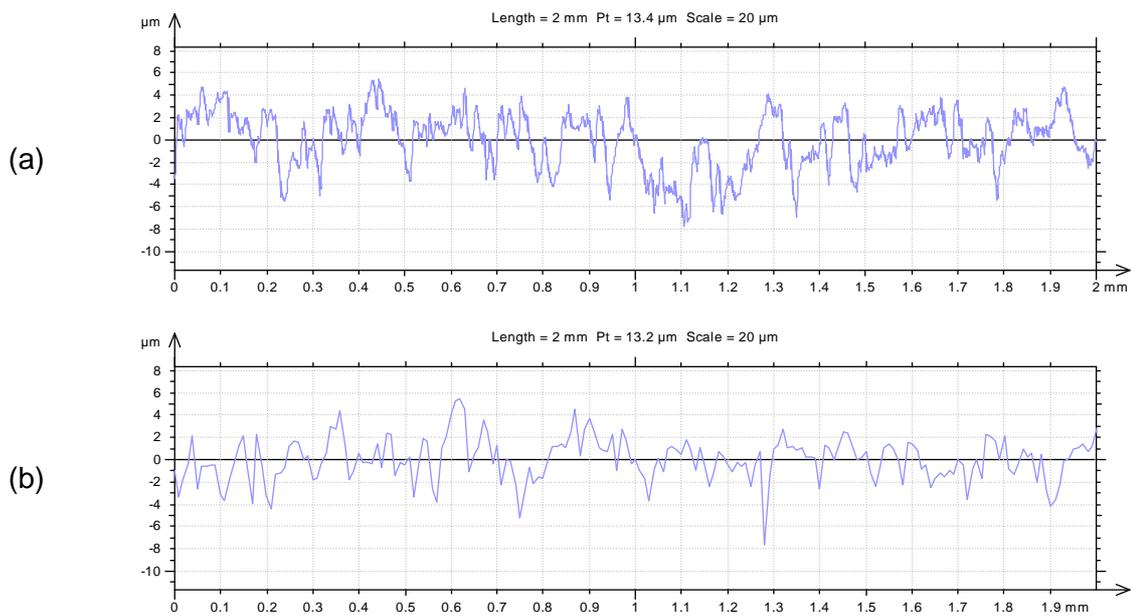


Figura 6.36 – Perfil de rugosidade, (a) leste oeste e (b) norte sul para a amostra AF4

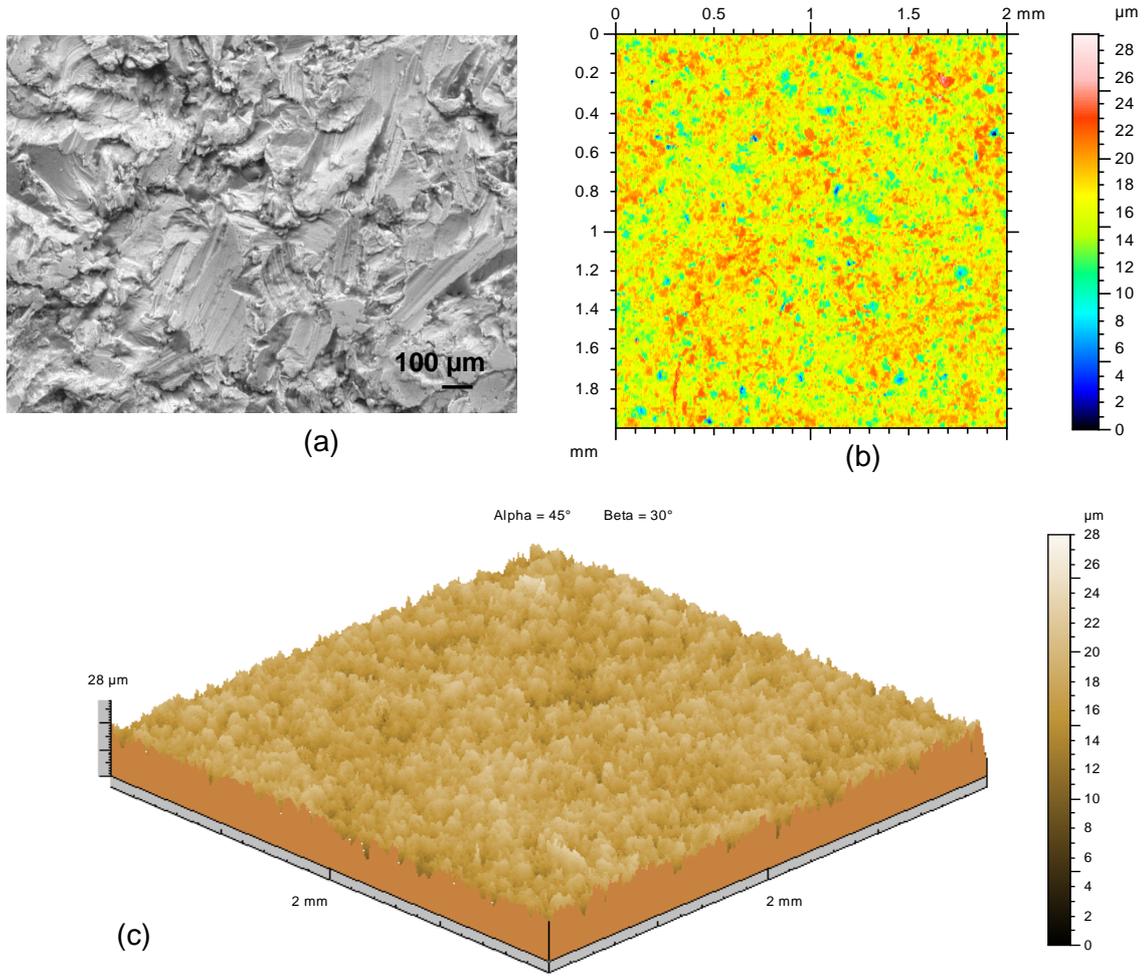


Figura 6.37 – Topografia DA5, (a) MEV, (b) diagrama de nível (c) topografia tridimensional

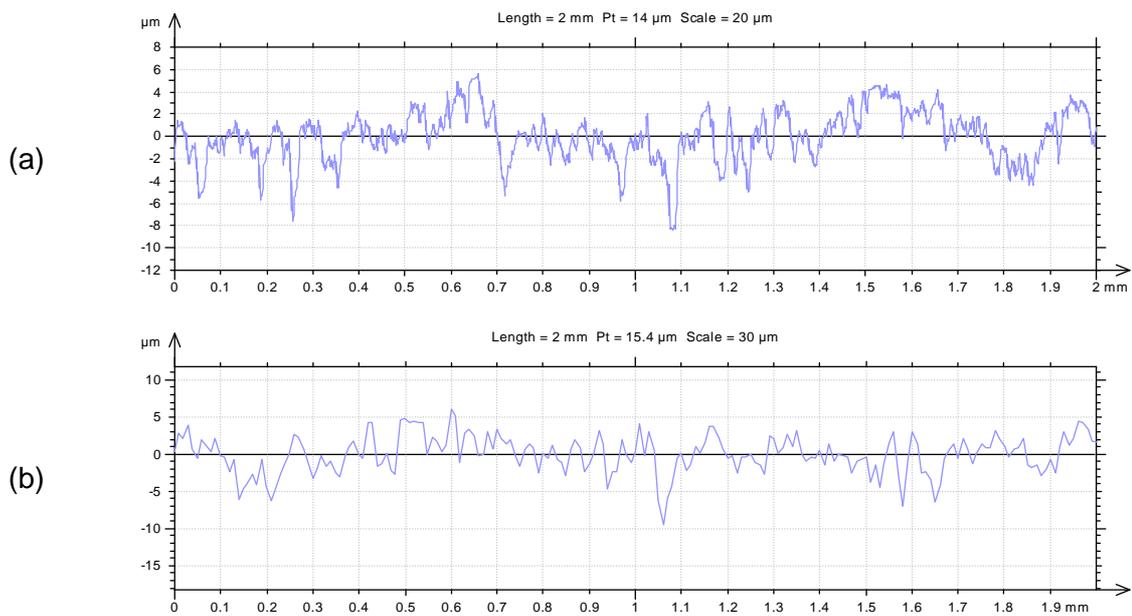


Figura 6.38 – Perfil de rugosidade, (a) leste oeste e (b) norte sul para a amostra DA5

A rugosidade média (S_a) do corpo de prova DA5 apresenta valores idênticos à AF3 e AF4. Nota-se que o valor de S_t é inferior, indicando que os picos e vales possuem menores amplitudes. O valor de S_{sk} negativo aponta que as amplitudes de maior frequência possuem valores menores do que a média. O valor de S_{ku} também mostra uma distribuição próxima à normal.

Tabela 6.21 – Valores de rugosidade para amostra DA5 erodida, parâmetros em μm

Local	S_a	S_q	S_t	S_{sk}	S_{ku}	Figura
A_{Erod}	1,900	2,460	29,200	-0,580	4,120	6.37

O corpo de prova DA6 tem sua superfície erodida apresentada na Fig. 6.39. Na Figura 6.39 (b), nota-se a presença de picos e vales dispersos, bem distribuídos na região avaliada, com poucos pontos pronunciados. A Figura 6.40 traz o perfil de rugosidade na região central de medição para a direção leste-oeste e norte-sul da amostra DA6. Observa-se uma característica típica de um perfil platô na Fig. 6.39 (c).

A Tabela 6.22 apresenta os parâmetros de rugosidade para a amostra DA6. Os valores de S_a e S_q são maiores do que as demais amostras avaliadas. Nota-se que o valor de S_{sk} e S_{ku} indica a presença de um perfil platô e uma distribuição próxima à normal.

Tabela 6.22 – Valores de rugosidade para amostra DA6 erodida, parâmetros em μm

Local	S_a	S_q	S_t	S_{sk}	S_{ku}	Figura
A_{Erod}	2,070	2,630	33,000	-0,538	3,820	6.39

A superfície erodida do corpo de prova DS3 é apresentada na Fig. 6.41. Na Figura 6.41 (b) e (c), há a presença de picos de pouca densidade de material, bem como de vales pontuais.

A Figura 6.42 traz o perfil de rugosidade na região central de medição para a direção leste-oeste e norte-sul da amostra DS3 e a Tab. 6.23 apresenta os parâmetros de rugosidade.

Tabela 6.23 – Valores de rugosidade para amostra DS3 erodida, parâmetros em μm

Local	S_a	S_q	S_t	S_{sk}	S_{ku}	Figura
A_{Erod}	2,180	2,820	40,800	-0,552	4,310	6.41

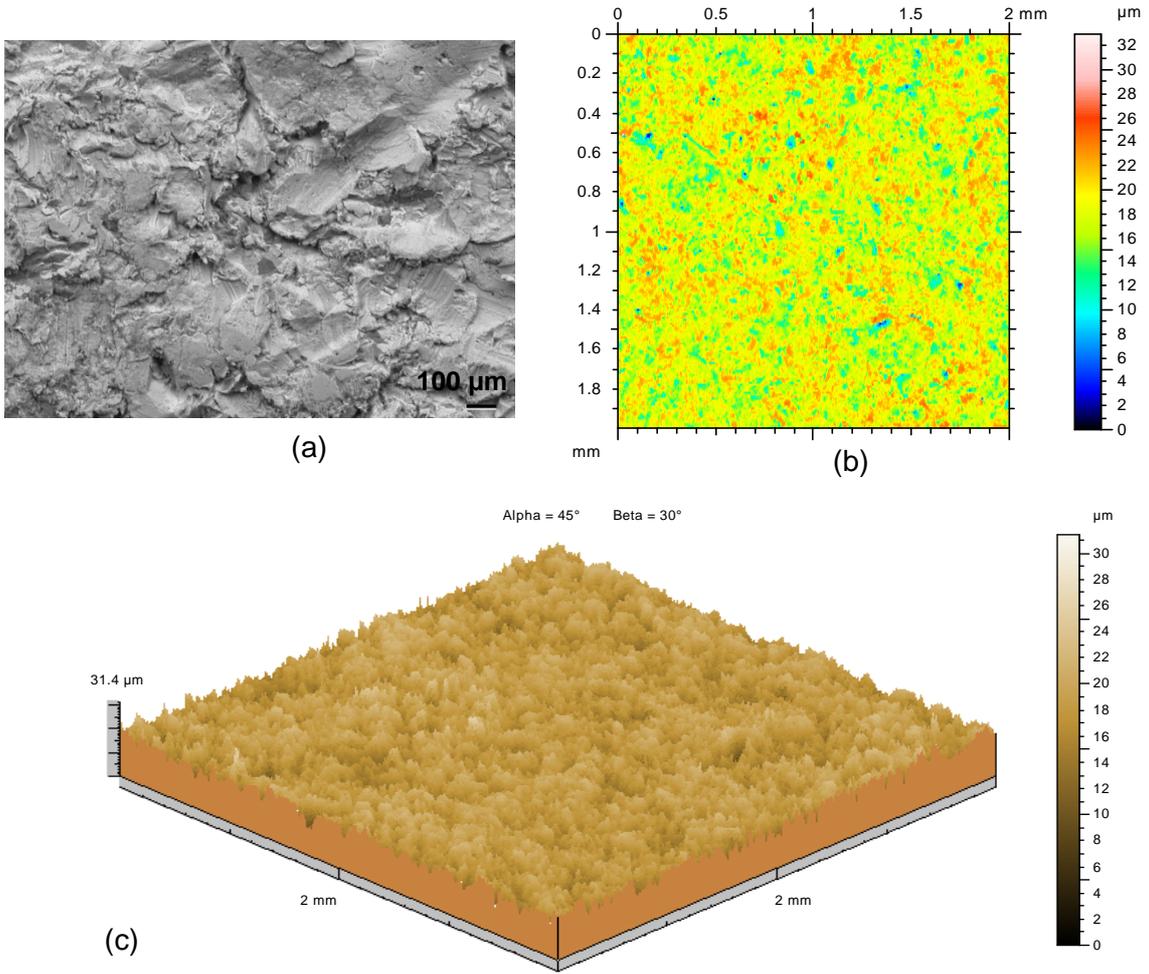


Figura 6.39 – Topografia DA6, (a) MEV, (b) diagrama de nível (c) topografia tridimensional

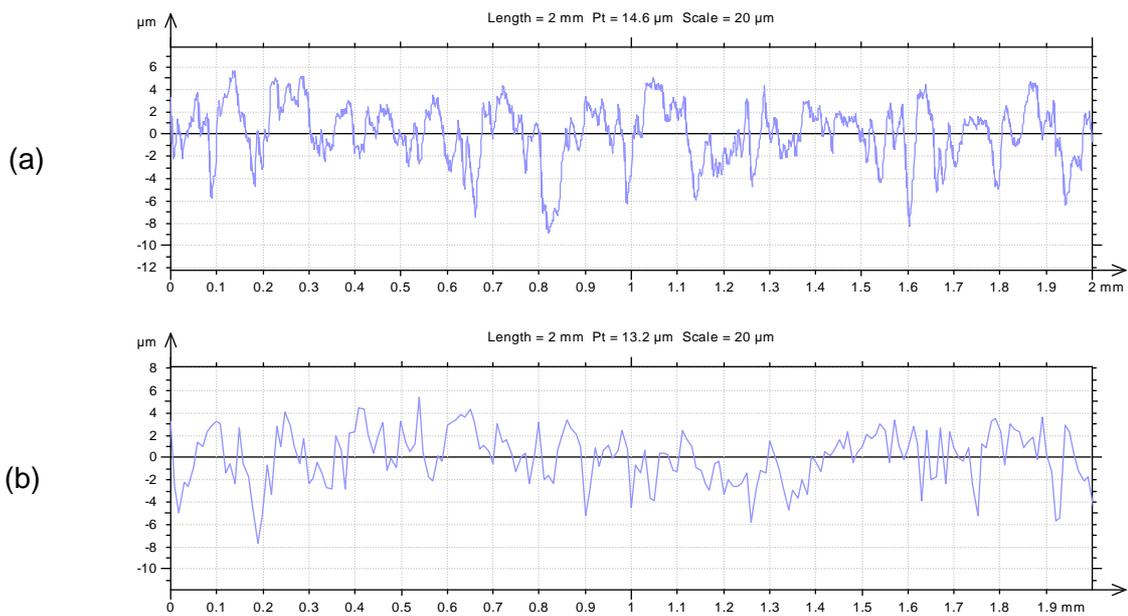


Figura 6.40 – Perfil de rugosidade, (a) leste oeste e (b) norte sul para a amostra DA6

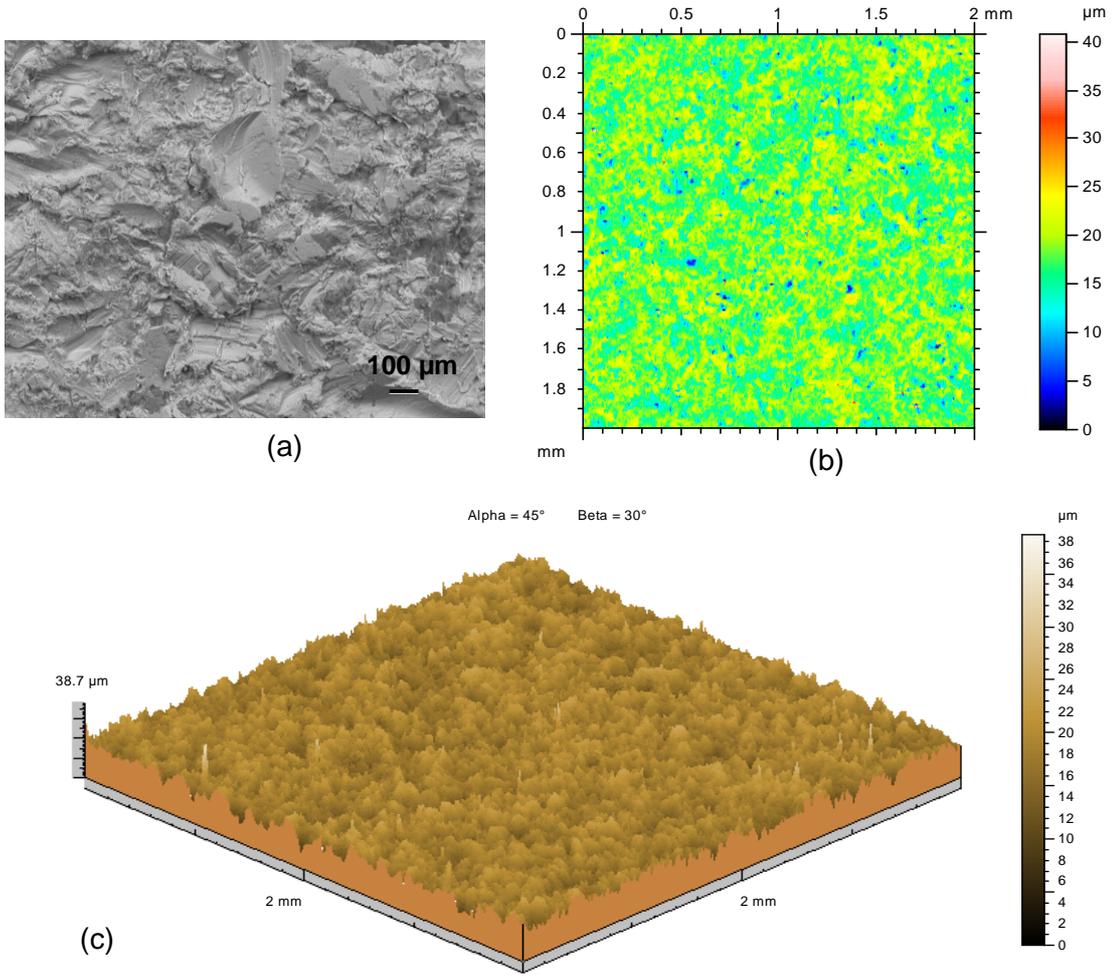


Figura 6.41 – Topografia DS3, (a) MEV, (b) diagrama de nível (c) topografia tridimensional

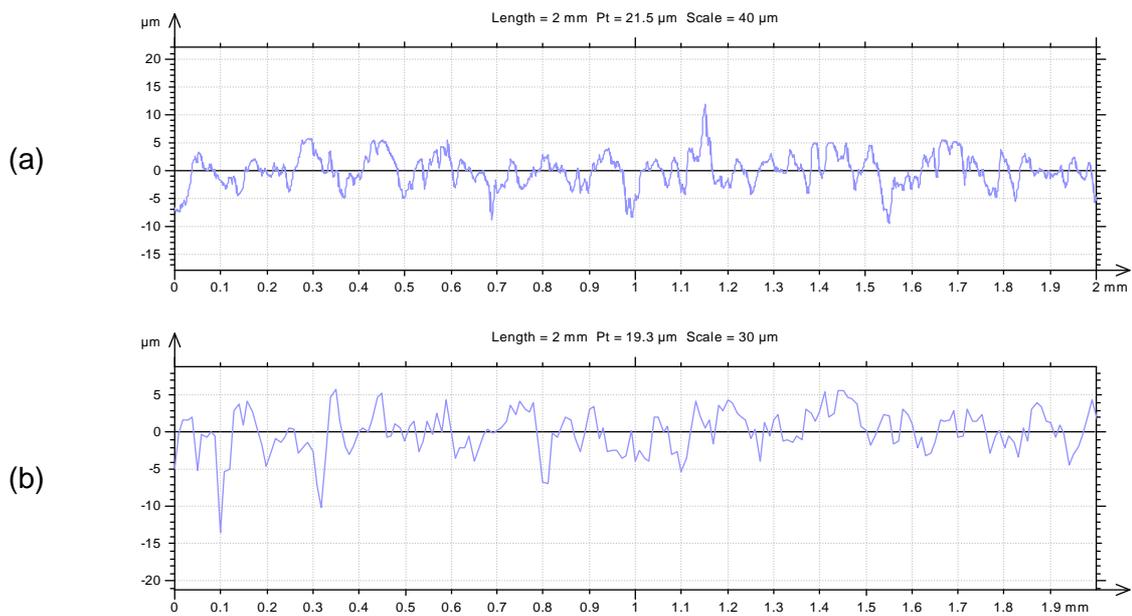


Figura 6.42 – Perfil de rugosidade, (a) leste oeste e (b) norte sul para a amostra DS3

Na Tabela 6.23, Sa e Sq possuem valores elevados quando comparados aos demais ensaios. Devido à presença de picos e vales com grandes amplitudes, têm-se um elevado valor de St. Como os parâmetros Ssk e Sku são fortemente afetados pelos picos e vales isolados, seus valores são superiores.

A superfície erodida do corpo de prova DS4 é apresentada na Fig. 6.43. Nota-se na Fig. 6.43 (b) e (c) a presença de uma região fortemente afetada pelo desgaste com uma depressão prolongada por toda a seção avaliada. Acredita-se que este ponto seja uma região de junção entre cordões. Esta região pode ser parte da ZAC, apresentando regiões de baixa resistência, portanto, com desgaste preferencial.

A Figura 6.44 traz o perfil de rugosidade na região central de medição para a direção leste-oeste e norte-sul da amostra DS4. A Tabela 6.24 apresenta os parâmetros de rugosidade para a amostra DS4.

Tabela 6.24 – Valores de rugosidade para amostra DS4 erodida, parâmetros em μm

Local	Sa	Sq	St	Ssk	Sku	Figura
A _{Erod}	2,280	2,980	44,700	-0,763	5,080	6.43

Nota-se que os valores de Sa e Sq são elevados, os maiores dos ensaios desta fase de misturas em aço inoxidável e ligas de cobalto. Entretanto, esse valor elevado de rugosidade não reflete a presença de desgaste severo.

Talvez sem a ocorrência do desgaste preferencial na amostra DS4, ter-se-ia o caso de uma das condições de soldagem mais resistentes ao desgaste por erosão. Da mesma forma, o parâmetro St possui um valor elevado devido a grande amplitude de picos e vales. Como houve picos e vales isolados, os valores de Ssk e Sku também são altos.

Os parâmetros de rugosidade desvio aritmético médio e quadrático para os ensaios nessas combinações são apresentados na Fig. 6.45.

Os valores de Sa e Sq para os ensaios em um mesmo processo de soldagem apresentam uma diferença em torno de 10%, apesar de DS4 ter um valor levemente superior de Sa e Sq, em relação aos demais ensaios. A amostra DS4 teve um desgaste preferencial, formando uma área de vales acentuados. Tal fato também se observa entre DA5 com valores menores de rugosidade e DA6 levemente superior. Entre AF3 e AF4, os valores estão em um mesmo nível.

Nota-se, na Fig. 6.46, uma maior amplitude de picos e vales para a amostra AF4, DS3 e DS4. Existe uma tendência de um maior desgaste gerar um achatamento do perfil, eliminando as irregularidades mais pronunciadas. Tal fato não se confirmou na Fig. 6.46, porque DS3 tem picos isolados e pontuais e DS4, vales acentuados.

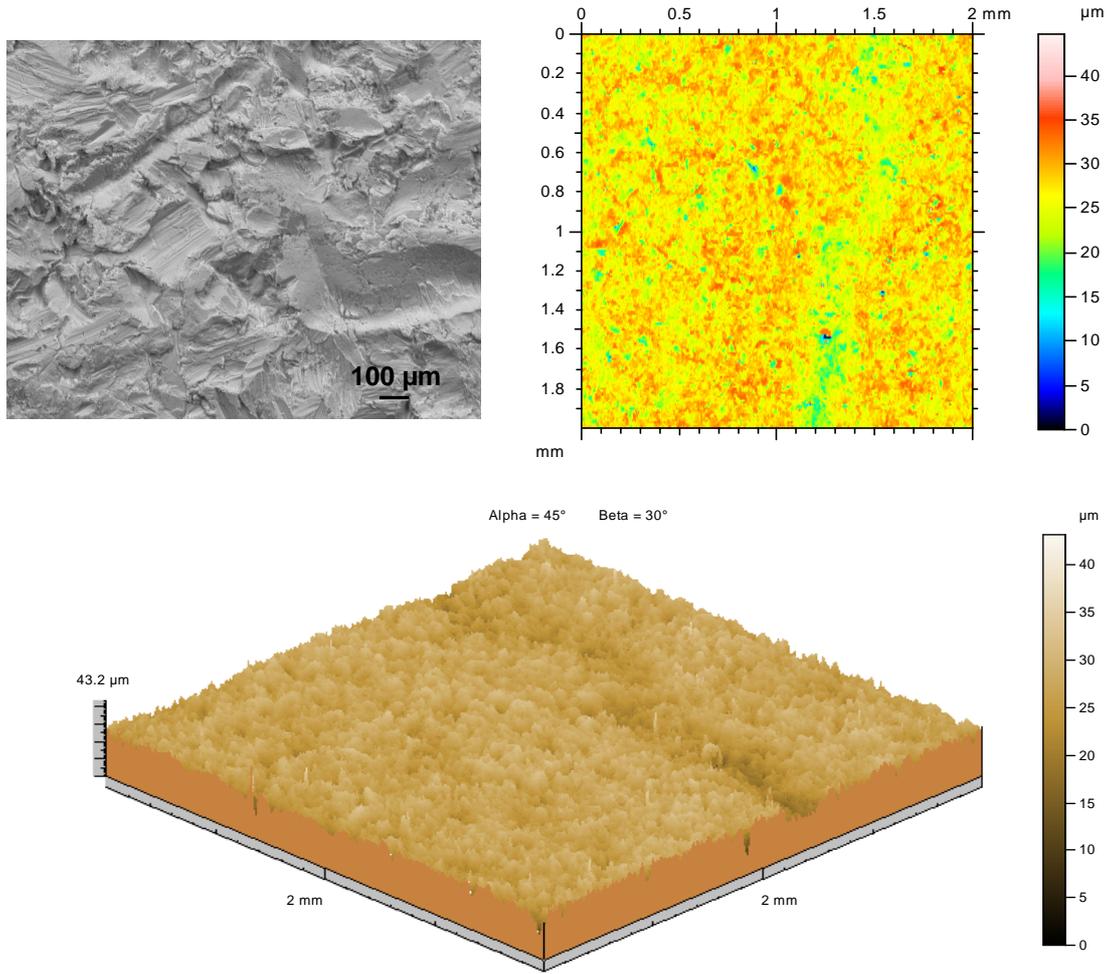


Figura 6.43 – Topografia DS4, (a) MEV, (b) diagrama de nível (c) topografia tridimensional

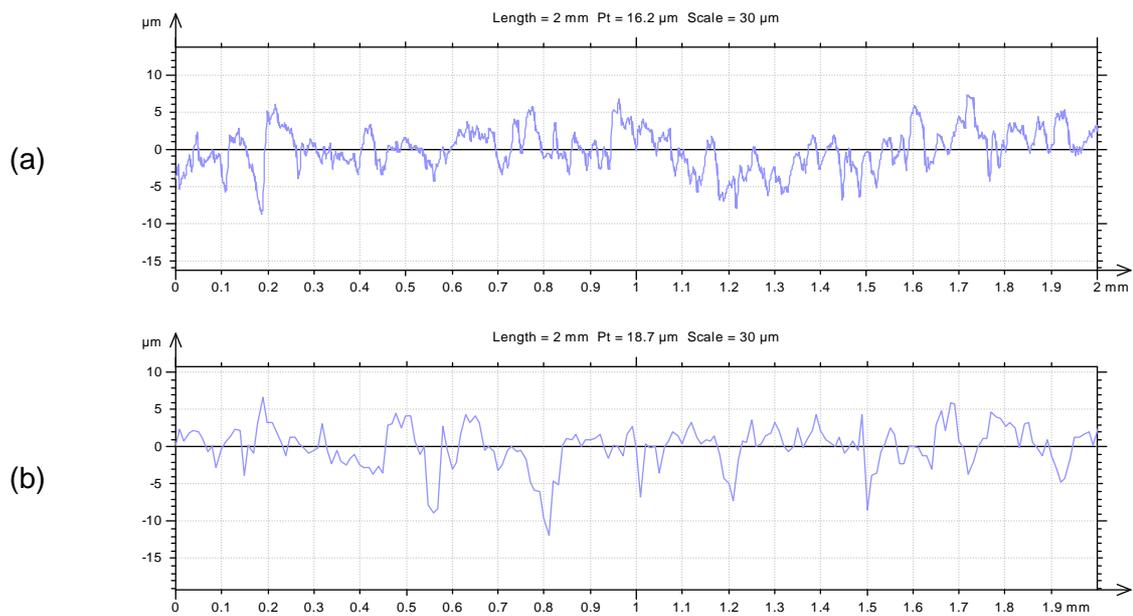


Figura 6.44 – Perfil de rugosidade, (a) leste oeste e (b) norte sul para a amostra DS4

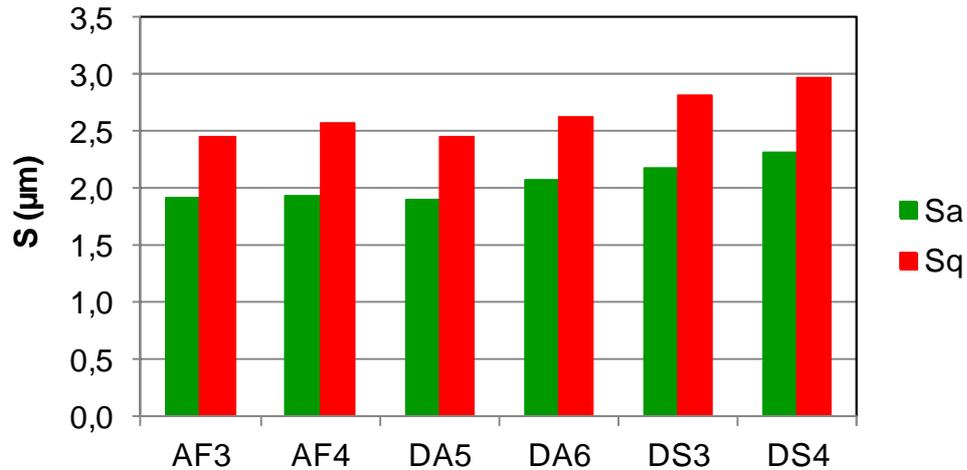


Figura 6.45 – Parâmetro Sa desvio aritmético médio do perfil e Sq desvio médio quadrático

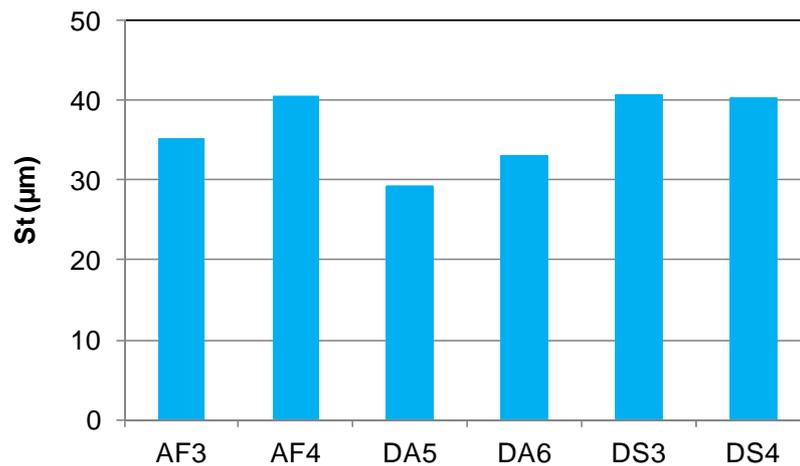


Figura 6.46 – Parâmetro St altura total

A avaliação linear na Fig. 6.47 apresenta uma tendência similar, na qual as medições lineares apontam para um destaque de picos e vales acentuados para DS3.

Com relação ao fator de assimetria Ssk (Fig. 6.48), todos os ensaios têm um valor negativo, indicando a ocorrência de um perfil tipo platô, com presença de maiores picos e menores vales. De fato, o teste DA5, DA6 e DS3 tem um valor absoluto elevado, porque os vales foram profundos localizados em uma área considerável.

Em relação ao fator de achatamento (Sku) na Fig. 6.49, os valores são superiores à 3 (três) em todos os casos, indicando uma distribuição normal. Neste caso, o teste com maior valor de Sku é o AF4, afetado provavelmente pela grande quantidade de picos e vales isolados.

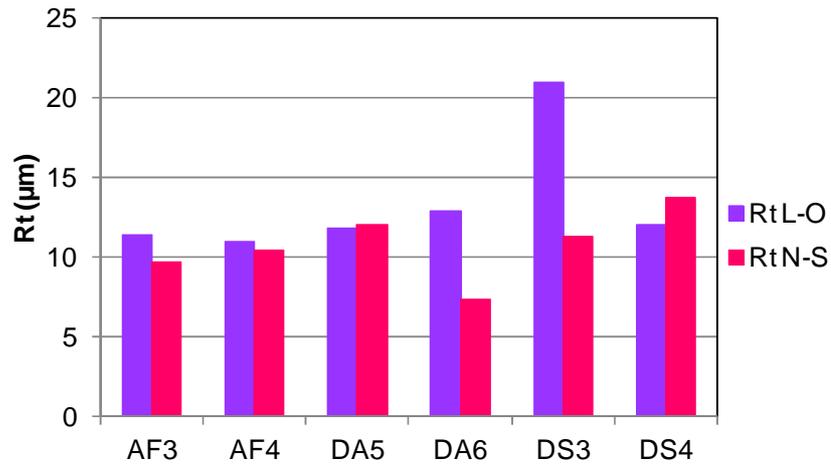


Figura 6.47 – Parâmetro R_t linear na direção leste oeste e norte sul

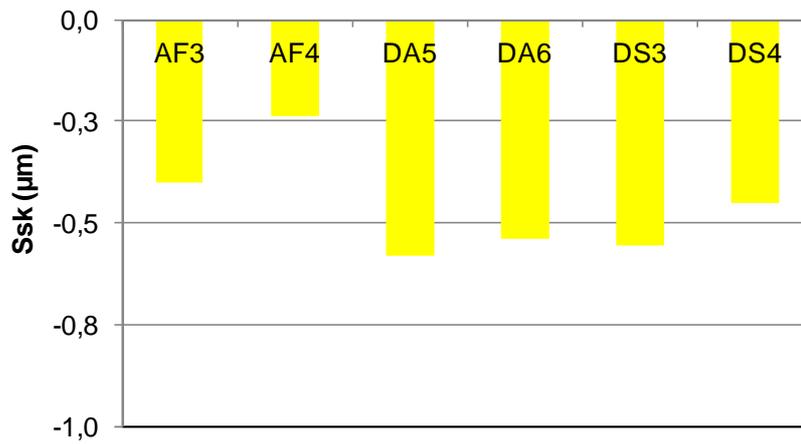


Figura 6.48 – Parâmetro S_{sk} fator de assimetria

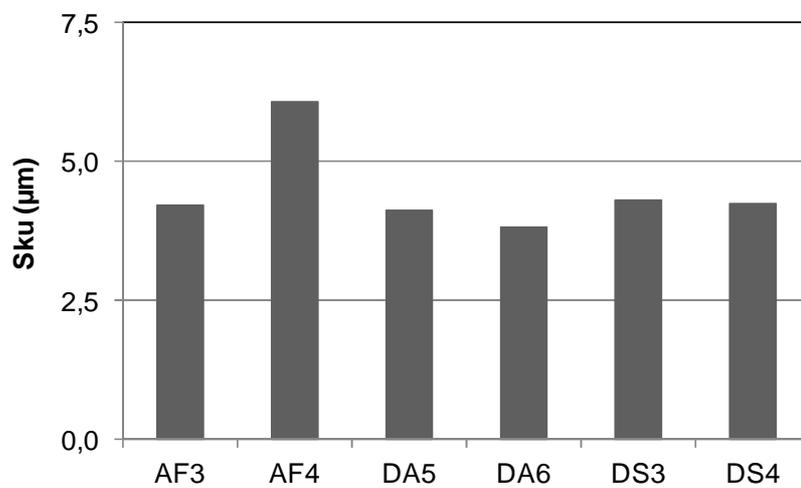


Figura 6.49 – Parâmetro S_{ku} fator de achatamento do perfil avaliado (kurtosis)

A Figura 6.50 apresenta a relação entre o parâmetro Ssk e Sku para a erosão. Espera-se um menor domínio morfológico para amostras com menor desgaste. Entretanto, como as amostras não são totalmente homogêneas devido à dinâmica do processo de soldagem e sua variação de microestrutura, isso não fica tão evidente na Fig. 6.50.

Ao analisar conjuntamente o fator de assimetria Ssk e o fator de achatamento Sku (Fig. 6.50), nota-se que, de forma geral, os testes possuem grande similaridade, permanecendo em uma região próxima, como notado para DA5, DA6 e DS3. A exceção ocorre para AF4 que está em posição um pouco afastada da condição inicial.

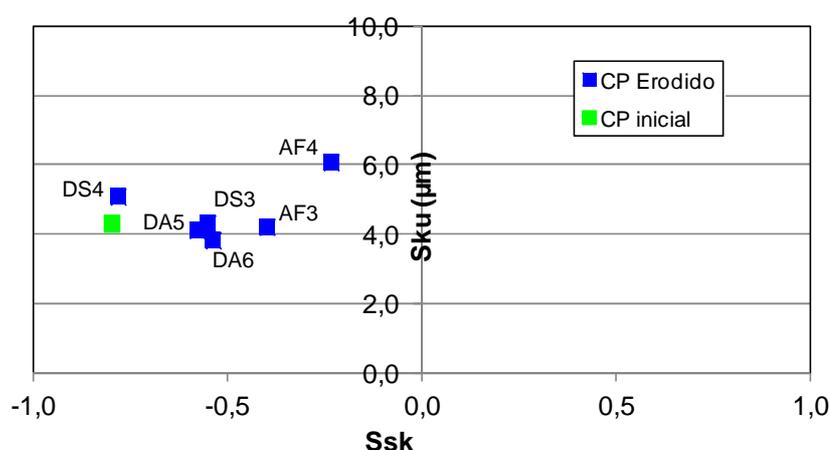


Figura 6.50 - Parâmetro Ssk fator de assimetria e Sku fator de achatamento do perfil avaliado (kurtosis) para erosão

Os corpos de prova para o processo MIG/MAG duplo arame estão bem mais próximos da condição inicial na Fig. 6.50 e o MIG/MAG arame frio está distante, indicando um maior espaço morfológico. Outro indicativo é de que a posição da amostra DS4 está muito próxima da condição inicial, sendo a segunda menor taxa de erosão para os ensaios realizados, muito próximo do desgaste de DA6.

Apesar de Camacho et al. (2013) observarem que, para as menores taxas de erosão, menores rugosidades foram obtidas, tal evidência não pode ser confirmada. As indicações de Camacho et al. (2013) são comuns em materiais como processados, que possuem uma microestrutura homogênea em sua superfície. Para as amostras de revestimento soldado, observa-se que a quantidade de fatores que podem influenciar na dinâmica do desgaste é muito grande. Apenas para exemplificar, a dureza da superfície obtida pelos processos de soldagem é muito heterogênea e com valores superiores às amostras em estado como fabricadas e usadas no trabalho de Camacho et al. (2013).

6.5. Testes de cavitação

A seguir são apresentados e discutidos os resultados de cavitação nas amostras de mistura em aço inoxidável austenítico e ligas de cobalto, soldadas pelos processos MIG/MAG arame frio na posição horizontal e MIG/MAG duplo arame paralelo na posição plana. Nos ensaios de erosão por cavitação, foram avaliadas as amostras AF3, AF4, DA5 e DA6 por representarem as condições extremas da quantidade das ligas de cobalto na amostra, ou seja, 50% no metal de adição para o processo MIG/MAG duplo arame e 12% para o MIG/MAG arame frio. Além disso, o cordão de solda para o processo MIG/MAG duplo arame série apresentou uma oscilação em sua largura que dificultaria a confecção dos corpos de prova de maiores dimensões, como no caso do ensaio de cavitação.

6.5.1. Desempenho durante a cavitação

A amostra AF3, composta por aço inoxidável austenítico e *Stellite 6*, foi submetida ao ensaio de cavitação durante 40 horas, com a determinação horária da perda de massa. A Tabela C.7 apresenta os resultados obtidos para a perda de massa.

A taxa de erosão instantânea para o ensaio AF3 é apresentada na Fig. 6.51. Provavelmente após as 2 horas iniciais, rompeu-se a fase de incubação, entrando em um regime estacionário até as 40 horas. A perda de massa acumulada está apresentada na Fig. 6.52. De acordo com a Fig. 6.52, a perda de massa acumulada para o ensaio AF3 foi de 18,42 mg.

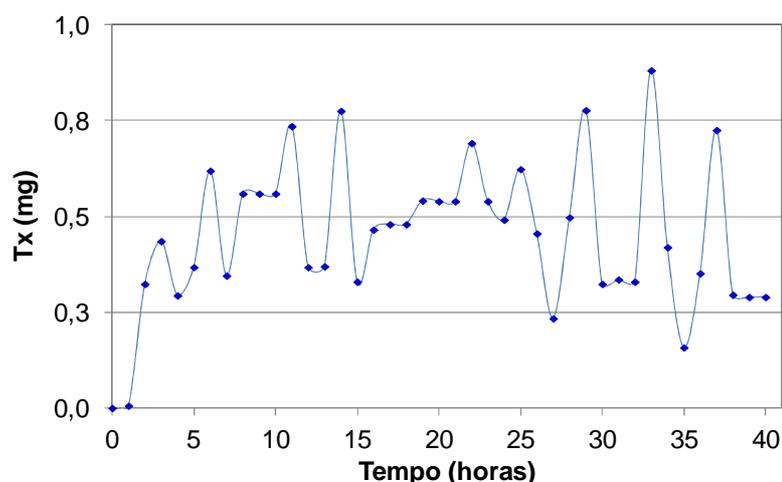


Figura 6.51 – Taxa de cavitação para a amostra AF3

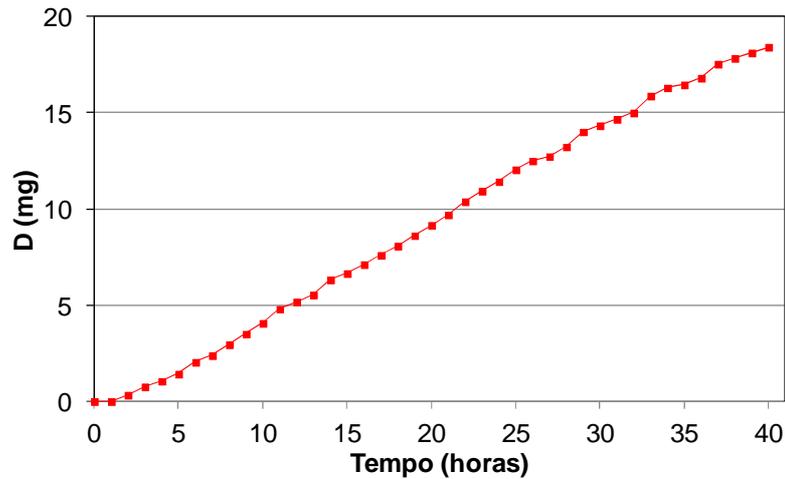


Figura 6.52 – Perda de massa acumulada para a amostra AF3

Na determinação da taxa de erosão visando a uma maior correlação na regressão linear, foi avaliada na região entre 15 e 40 horas, como mostrado na Fig. 6.53. A região escolhida está de acordo com o procedimento proposto na norma ASTM G-32-10 (2010), ou seja, usando a porção final mais íngreme da curva para a definição da taxa de erosão.

A taxa de erosão média foi de 0,48 mg/h (Fig. 6.53) com uma correlação acima de 99%.

A amostra AF4 tem seu desempenho à erosão apresentada na Tab. C.8, a taxa de erosão instantânea na Fig. 6.54 e a perda de massa acumulada na Fig. 6.55. Apesar de a incubação ser superada após as 4 horas iniciais de ensaio, a perda de massa acumulada atingiu valores da ordem de 30 mg.

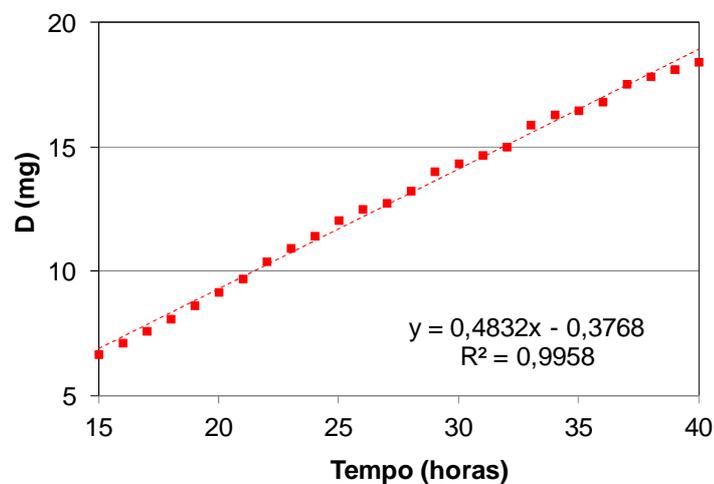


Figura 6.53 – Taxa de cavitação para AF3 entre 15 e 40 horas

A avaliação da região entre 15 e 40 horas para a amostra AF4 está na Fig. 6.56. Nota-se que a taxa de erosão de 0,93 mg/h é muito superior a AF3.

Nos ensaios de cavitação, a leve adição de ligas de cobalto no processo MIG/MAG arame frio afetou em ambos os casos a resistência ao desgaste. Analisando a taxa de erosão média para os ensaios com uso de aço inoxidável austenítico com valores acima de 1 mg/h, tem-se 0,93 mg/h para a adição de *Stellite 21* e 0,48 mg/h para *Stellite 6*.

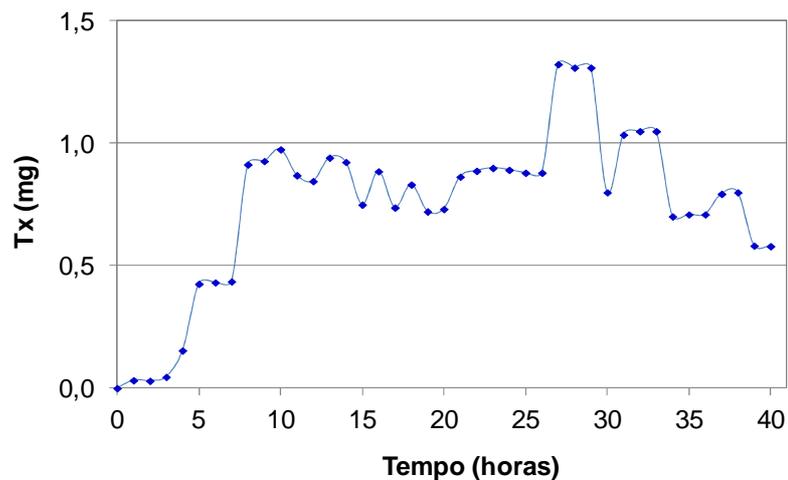


Figura 6.54 – Taxa de cavitação para a amostra AF4

Da mesma forma, as amostras DA5 e DA6 (respectivamente com presença de *Stellite 6* e *21*) foram submetidas ao ensaio de erosão por cavitação durante um período de 40 horas, com a determinação da perda de massa em intervalos de 1 hora.

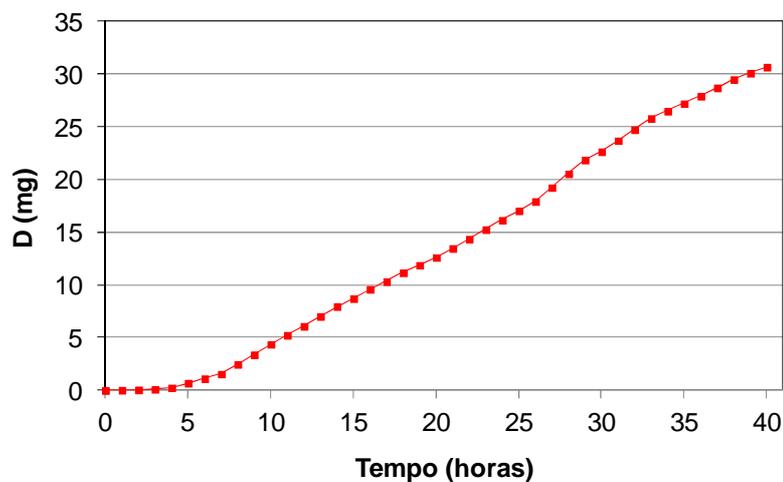


Figura 6.55 – Perda de massa acumulada para a amostra AF4

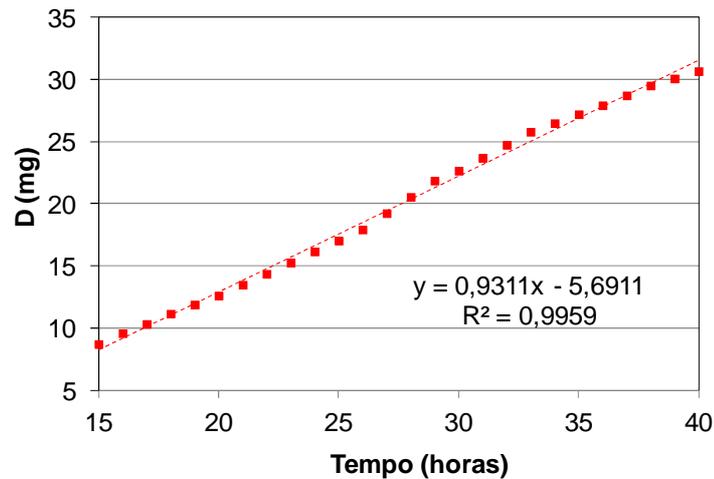


Figura 6.56 – Taxa de cavitação para a amostra erodida AF4 entre 15 e 40 horas

A taxa de erosão instantânea e a perda de massa acumulada para o ensaio DA5 estão apresentadas na Tab. C.9. A evolução em termos de taxa de erosão instantânea está na Fig. 6.57 e perda de massa acumulada, na Fig. 6.58. A taxa de erosão média para o ensaio DA5 está apresentada na Fig. 6.59 com valores em torno de 1,05 mg/h.

Tanto a perda de massa acumulada, com valores da ordem de 34,00 mg, como a taxa de erosão para o ensaio DA5 assumem valores próximos à AF4, ambos com a presença da liga de cobalto *Stellite 21*.

Ainda assim, estes valores estão abaixo dos resultados obtidos para o ensaio DA4, com ambos os arames em aço inoxidável austenítico com perda de massa acumulada em 16,654 mg para um período de 20 horas e taxa de erosão de 1,14 mg/h.

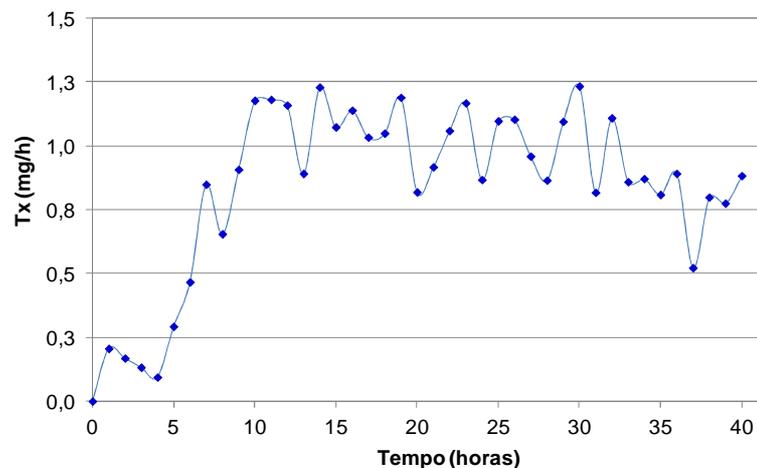


Figura 6.57 – Taxa de cavitação da amostra DA5

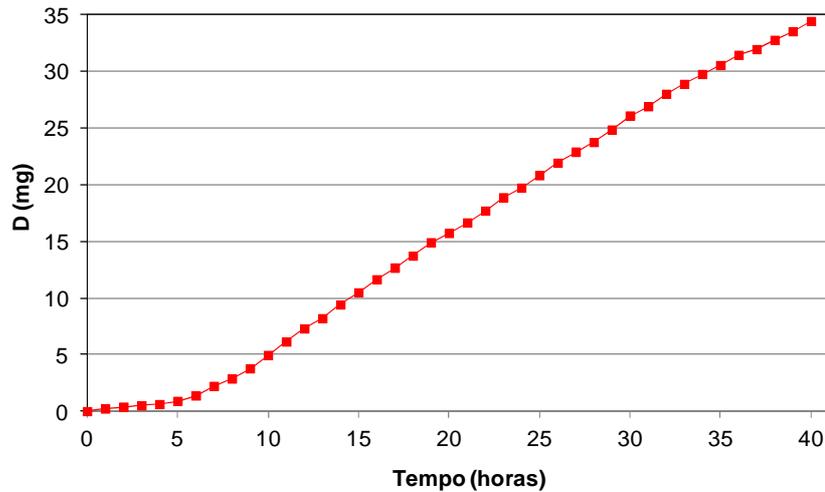


Figura 6.58 – Perda de massa acumulada por cavitação da amostra DA5

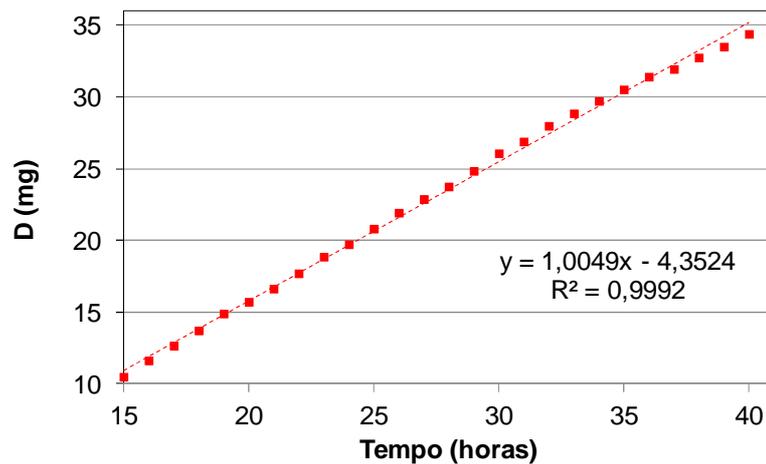


Figura 6.59 – Taxa de cavitação para a amostra cavitada DA5 entre 15 e 40 horas

Para o ensaio DA6, a Tab. C.10 apresenta a perda de massa ao longo das 40 horas. Nota-se que os valores de perda de massa acumulada em torno de 12 mg são os menores para os ensaios realizados com as misturas de aço inoxidável austenítico e ligas de cobalto.

A taxa de erosão instantânea é apresentada na Fig. 6.60 e a perda de massa acumulada, na Fig. 6.61. Na Fig. 6.60, a incubação foi superada provavelmente na 1ª hora, com um desgaste superior a partir das 10 horas.

A Figura 6.62 apresenta a taxa de erosão de 0,4614 mg/h que é o menor valor observado para as amostras feitas com a combinação de arames em aço inoxidável austenítico e ligas de cobalto. Nota-se a existência de equivalência entre o resultado observado para a erosão e cavitação, sendo a amostra DA6 de desempenho superior.

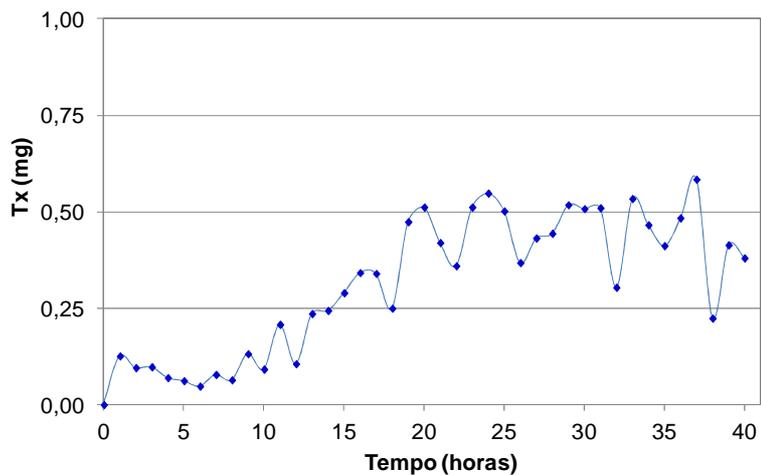


Figura 6.60 – Taxa de cavitação da amostra DA6

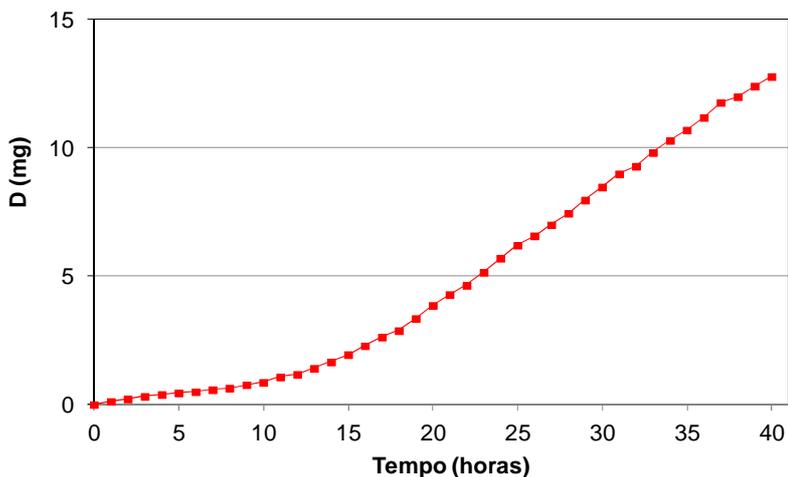


Figura 6.61 – Perda de massa acumulada por cavitação da amostra DA6

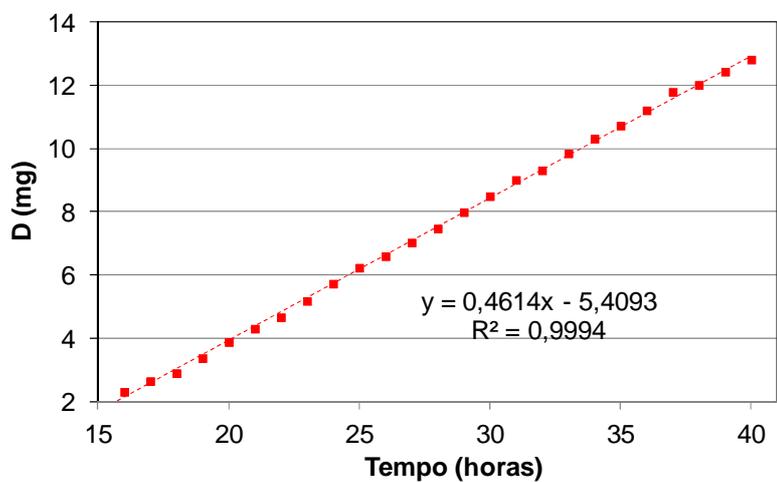


Figura 6.62 – Taxa de cavitação para a amostra erodida DA6 entre 15 e 40 horas

A taxa de erosão instantânea de todas as amostras em mistura de ligas de aço inoxidável austenítico e ligas de cobalto avaliadas na cavitação é apresentada na Fig. 6.63.

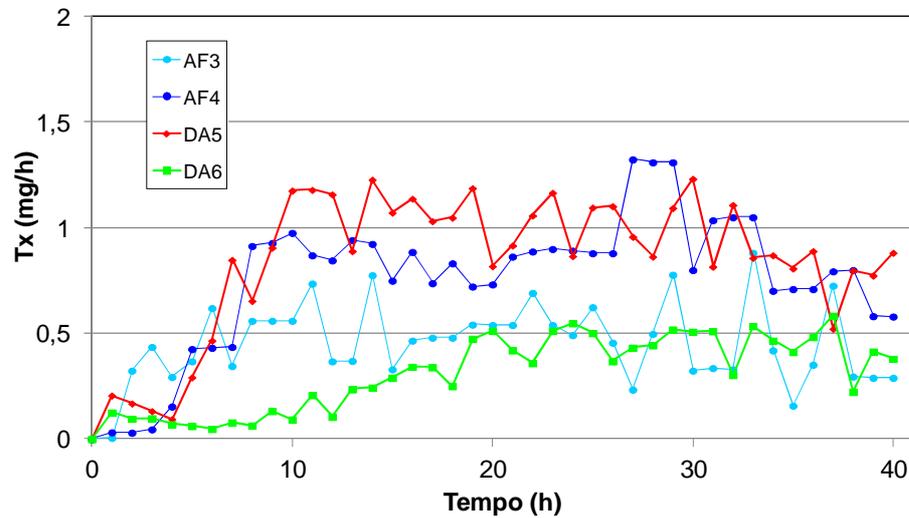


Figura 6.63 – Taxa de cavitação das combinações em aço inoxidável austenítico e ligas de cobalto

Observa-se que as amostras AF4 e DA5, apesar de soldadas com ligas de cobalto diferentes, possuem uma característica idêntica. A exceção ocorreu no início, porque DA5 superou a atenuação logo na 1ª hora e AF4, provavelmente, na 5ª hora.

Na Figura 6.64, têm-se as amostras avaliadas nesta etapa em termos de perda de massa acumulada na cavitação.

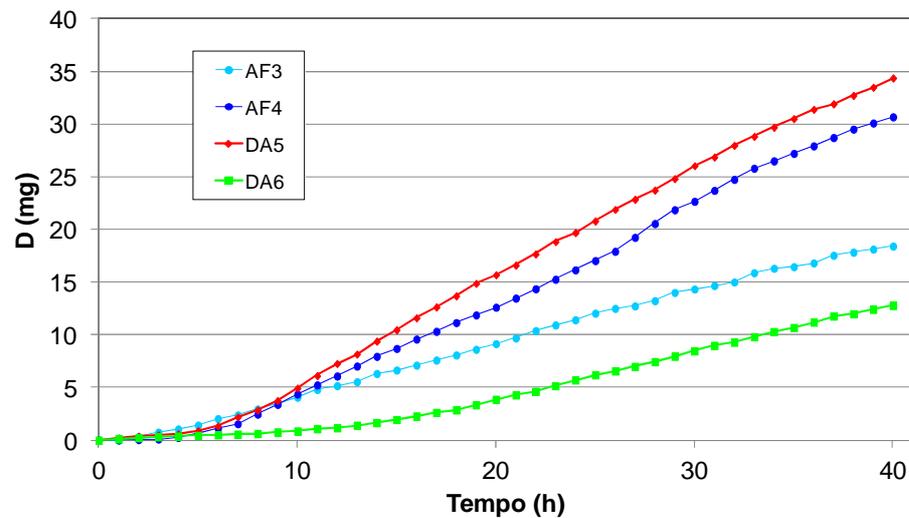


Figura 6.64 – Perda de massa por cavitação das combinações em aço inoxidável austenítico e ligas de cobalto

O melhor desempenho da amostra DA6 em relação à resistência ao desgaste por cavitação destaca-se tendo em vista a sua característica também superior na erosão. Com isso, acredita-se que a adição da liga de cobalto *Stellite 21* nas amostras, em quantidades iguais ao do aço inoxidável austenítico como ocorre no processo MIG/MAG duplo arame paralelo, possa proporcionar uma resistência muito superior ao revestimento.

Em quantidades pequenas, o desempenho aparentemente não é afetado pela presença do *Stellite 21*, como aconteceu na amostra AF4. Outra constatação é de que a amostra AF3 possui uma melhor resistência à cavitação do que AF4. Por fim, a amostra DA5 surpreende por apresentar um comportamento muito próximo à amostra DA4, soldada somente com aço inoxidável austenítico.

A perda de massa acumulada em todos os ensaios do processo MIG/MAG duplo arame é apresentada na Fig. 6.65. Destaca-se novamente a proximidade da perda de massa acumulada para os testes DA4 e DA5, apesar da composição diferente dos metais de adição. Uma possível explicação para este fato no corpo de prova DA5 está na formação do cordão de solda com regiões de pouca mistura entre o arame em aço inoxidável austenítico e a liga de cobalto. Acredita-se que estas regiões pobres em cobalto possam apresentar um desgaste preferencial com amplificação da perda de massa. No teste DA6, este fato não ocorreu, minimizando o desgaste. Nota-se, ainda, que a amostra DA6 é soldada com *Stellite 21* com menor teor de carbono e cobalto.

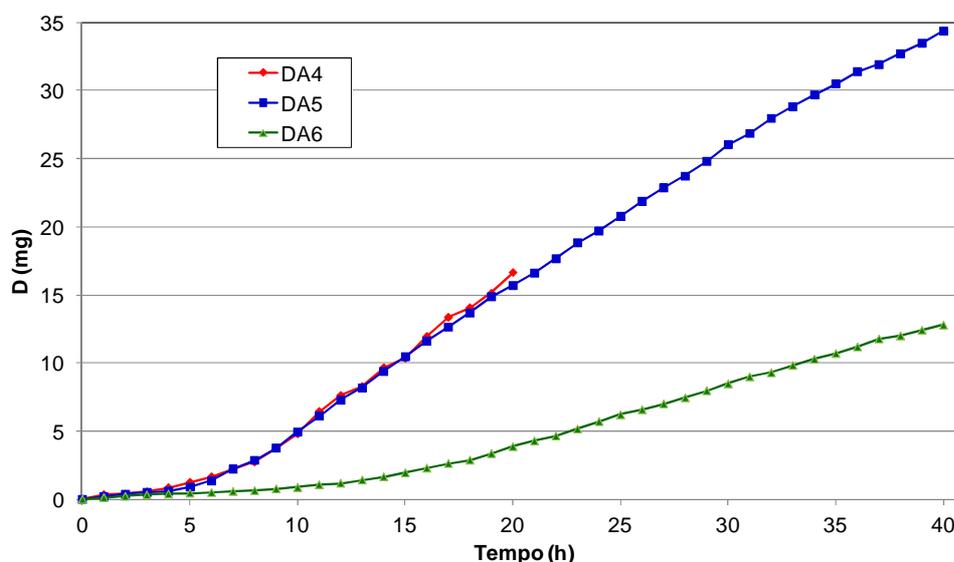


Figura 6.65 – Perda de massa acumulada para as amostras soldadas pelo processo duplo arame paralelo

No trabalho de Procopiak et al. (2000), foram realizados testes com o *Stellite 21* e Hidroloy 914, ficando evidente que a resistência à cavitação não está relacionada com a dureza, como acontece na erosão. Neste caso, em diferentes tratamentos superficiais em materiais de dureza similar, a resistência à cavitação encontrada foi diferente. Segundo Ribeiro (2007), nas ligas de cobalto, quanto maior for o tempo para que ocorra a transformação de fase, maior o tempo de incubação e melhor a resistência à cavitação.

Como DA4 e DA5 apresentaram um comportamento próximo de desgaste, é necessário aprofundar o estudo da característica superficial da amostra para entender os fatores de influência. No próximo item, será apresentada a análise da topografia das amostras soldadas com mistura em aço inoxidável austenítico e ligas de cobalto.

6.5.2. Análise das características topográficas das amostras cavitadas

A Figura 6.66 apresenta a característica superficial da amostra AF3. Na Figura 6.66 (c) e (d), existem áreas de desgaste preferencial com vales profundos e isolados, indicando a presença de regiões de baixa resistência.

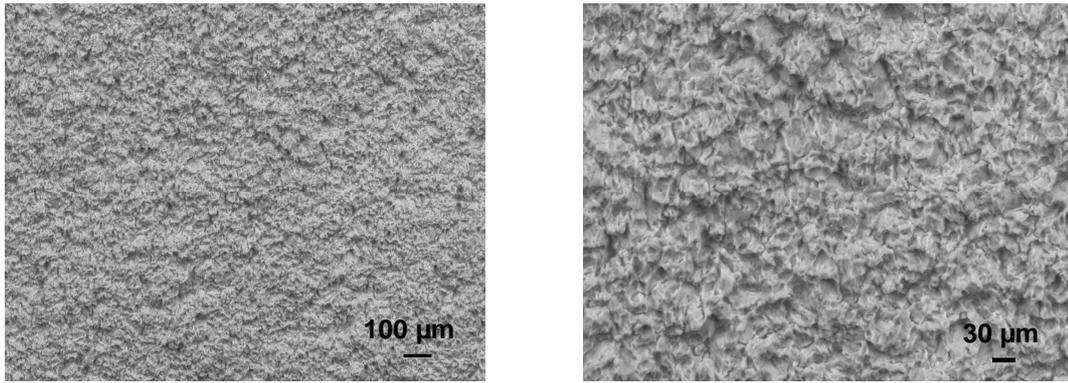
A Figura 6.67 apresenta o perfil de rugosidade na região central de medição para a direção leste-oeste e norte-sul da amostra AF3. O perfil da seção longitudinal cavitada é apresentado na Figura 6.67 (c).

A Tabela 6.36 apresenta os parâmetros de rugosidade para a amostra AF3 cavitada, afetados pelas regiões com desgaste severo. Destaca-se na Tab. 6.36 o valor elevado de St de 30,700 μm . Ao avaliar Sp com valor de 10,300 μm e Sv com 20,400 μm , constata-se que o maior vale tem amplitude superior ao pico mais intenso. O valor negativo de Ssk indica que as amplitudes de maior frequência possuem valores menores do que a média, assim como o valor de Sku reflete a presença de picos isolados na amostra.

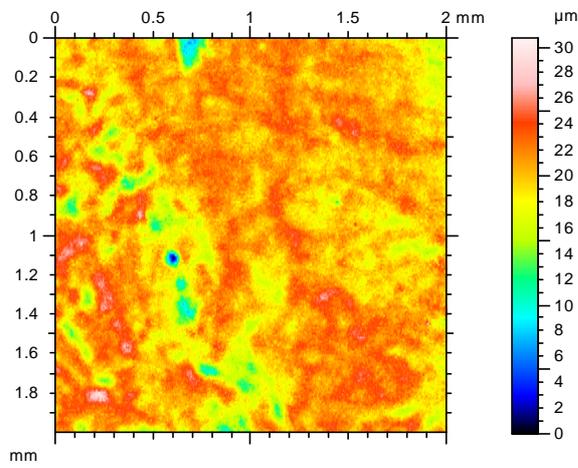
Tabela 6.36 – Valores de rugosidade para amostra AF3 cavitada, parâmetros em μm

Local	Sa	Sq	St	Sp	Sv	Ssk	Sku	Figura
A _{Cav}	1,810	2,390	30,700	10,300	20,400	-0,910	5,680	6.66

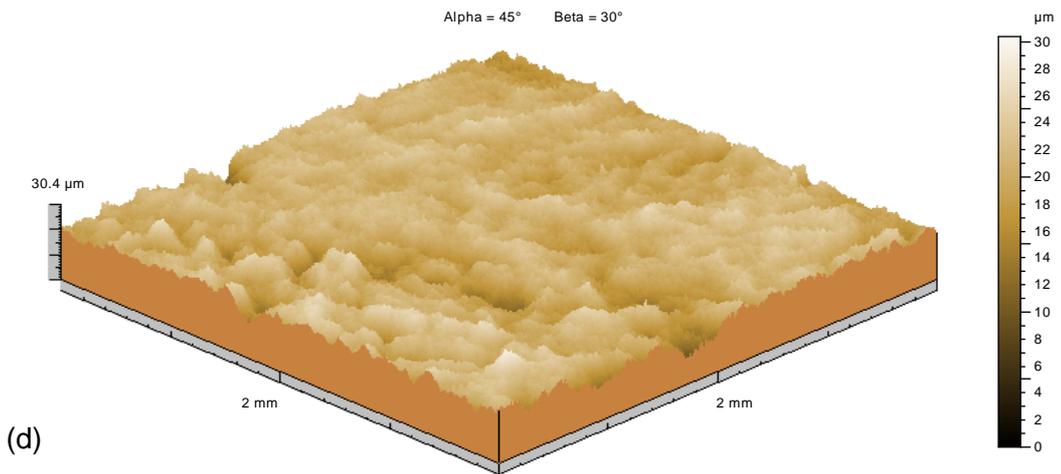
Na Figura 6.67 (c), nota-se que, em ambas as extremidades direita e esquerda do perfil longitudinal de rugosidade, aconteceram picos de grande intensidade e um aprofundamento em sua vizinhança, indicando a presença de forte deformação. A região central possui uma rugosidade relativamente uniforme, apesar de algumas regiões de vales profundos.



(a) (b)



(c)



(d)

Figura 6.66 – Aspecto topográfico da amostra cavitada AF3

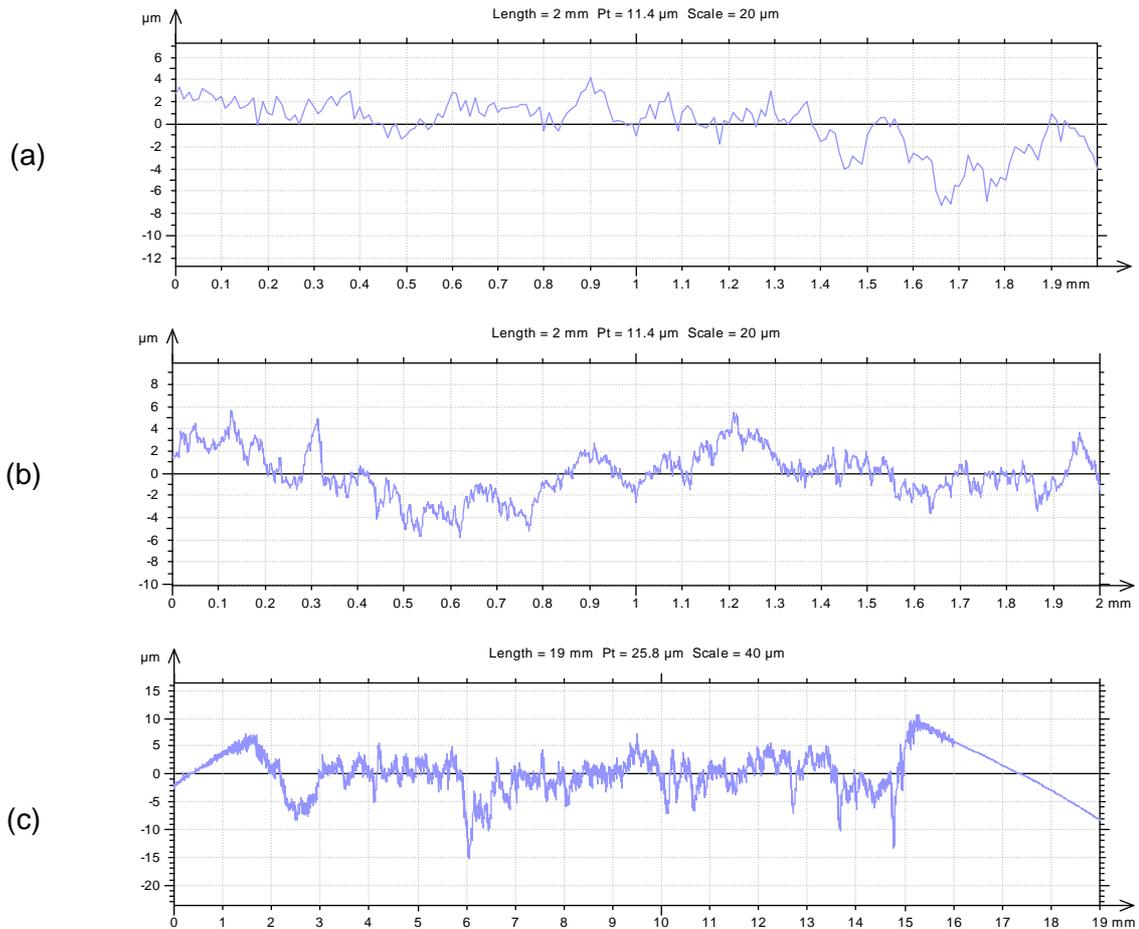


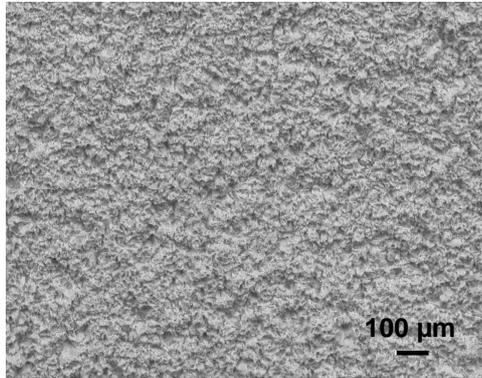
Figura 6.67 – Perfil de rugosidade, (a) leste oeste, (b) norte sul e (c) perfil da seção longitudinal da amostra cavitada AF3

Allenstein et al. (2014) analisaram a cavitação em superfícies de aço inoxidável martensítico CA6-NM e amostras nitretadas deste material. Durante a fase de incubação, não houve perda de massa significativa na amostra. Na peça não nitretada, com 2 horas de cavitação, alcançou-se a fase de transição entre incubação e aceleração, reforçada pelos valores de perda de massa. Assim como em Allenstein et al. (2014), o aspecto inicial liso da superfície foi substituído por uma alta densidade de pequenas covas e crateras finamente distribuídas (Fig. 6.66 a e b) por toda a superfície erodida, indicando a provável superação da fase de aceleração na amostra AF3.

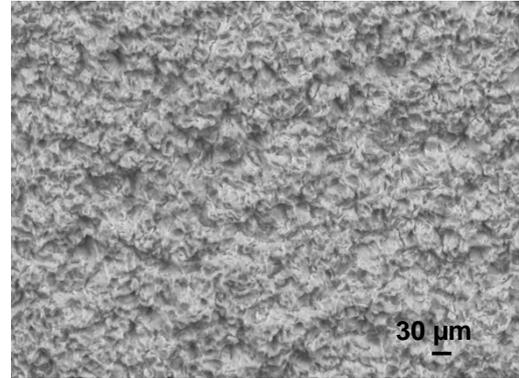
A topografia da amostra AF4 é mostrada na Fig. 6.68. Na Figura 6.68 (b), existem áreas de vales profundos e isolados. Tal fato também é notável na Figura 6.68 (c). Na Figura 6.69 estão os perfis de rugosidade na região leste oeste, norte sul e na seção longitudinal. Para estas regiões, a Tab. 6.37 apresenta os parâmetros de rugosidade para AF4.

Tabela 6.37 – Valores de rugosidade para amostra AF4 cavitada, parâmetros em μm

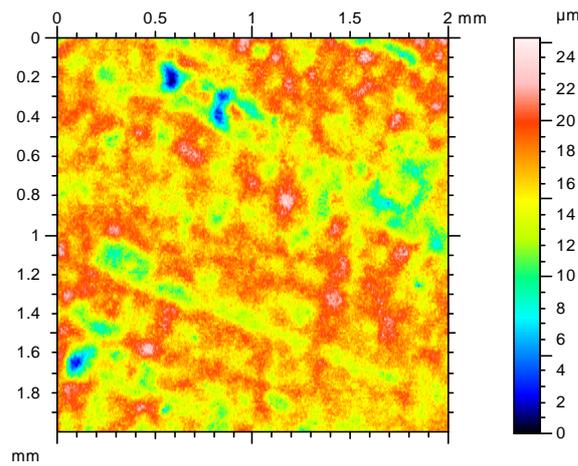
Local	Sa	Sq	St	Sp	Sv	Ssk	Sku	Figura
A _{Cav}	1,970	2,570	25,300	9,220	16,100	-0,720	4,940	6.68



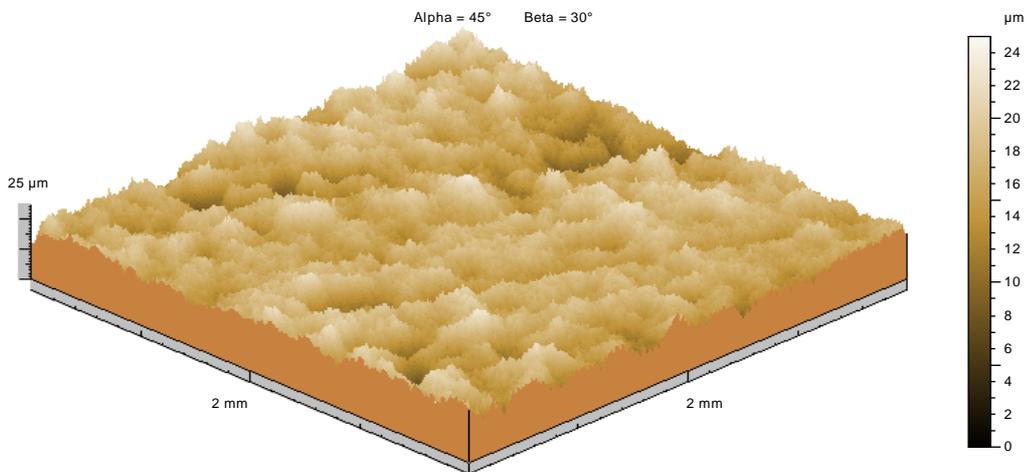
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 6.68 – Aspecto topográfico da amostra cavitada AF4

Os valores de S_a e S_q são superiores à AF3, enquanto o valor de S_t é menor, indicando novamente que maiores valores de desgaste tendem a formar picos e vales de menor intensidade. O perfil é tipo platô com valor de S_{sk} de $-0,720 \mu\text{m}$. Devido à presença de picos ou vales isolados, S_{ku} vale $4,940 \mu\text{m}$.

Ao analisar os valores de rugosidade para a seção longitudinal de AF4 (P_{Long} na Tab. 6.37), nota-se que a profundidade do maior vale (S_v) é menor do que em AF3. Entretanto, nota-se também uma deformação elevada devido à cavitação, o que causa um acúmulo de material nas bordas (Fig. 6.69 c).

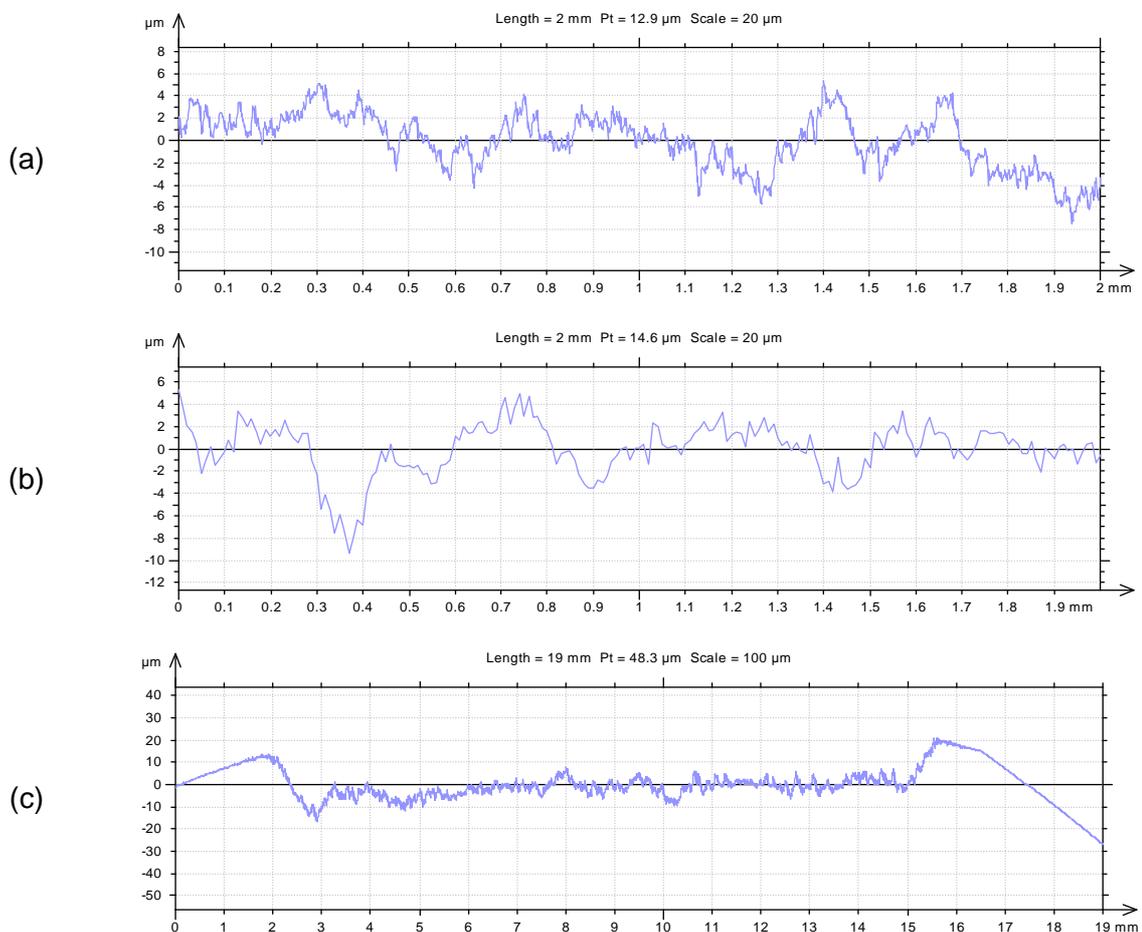


Figura 6.69 – Perfil de rugosidade, (a) leste oeste, (b) norte sul e (c) perfil ao longo do diâmetro da amostra cavitada AF4

Na amostra DA5, ocorreu um desgaste preferencial em uma determinada região do corpo de prova. A Figura 6.70 ilustra o fato, sendo perceptíveis os desvios macrogeométricos com aspecto de ondas em parte do corpo de prova denominado região ii. Esta região fortemente desgastada (Fig. 6.70 a e b, região ii) provavelmente tenha sido decisiva na elevada perda de massa para a amostra DA5.