

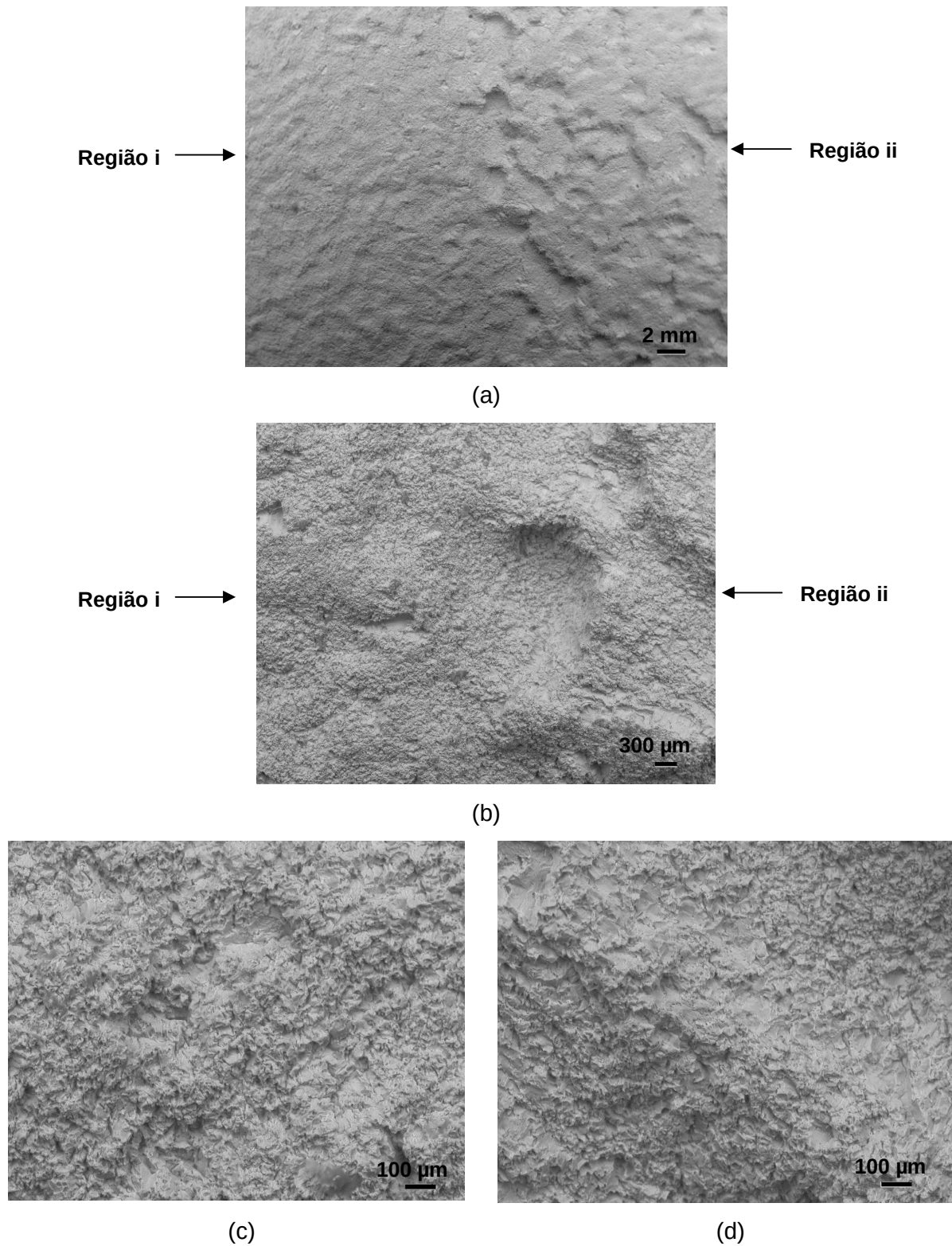


Figura 6.70 – (a) MEV 50x; (b) MEV 250X; (c) MEV 1000 x região i e (d) MEV 1000x região ii

Como no MIG/MAG duplo arame paralelo um dos metais de adição é em aço inoxidável austenítico e o outro em liga de cobalto, pode ter ocorrido uma mistura desigual

no cordão de solda, e um desgaste preferencial em regiões de menor resistência, envolvendo inclusive a região da ZAC. O aspecto topográfico da amostra DA5 está apresentado na Fig. 6.71.

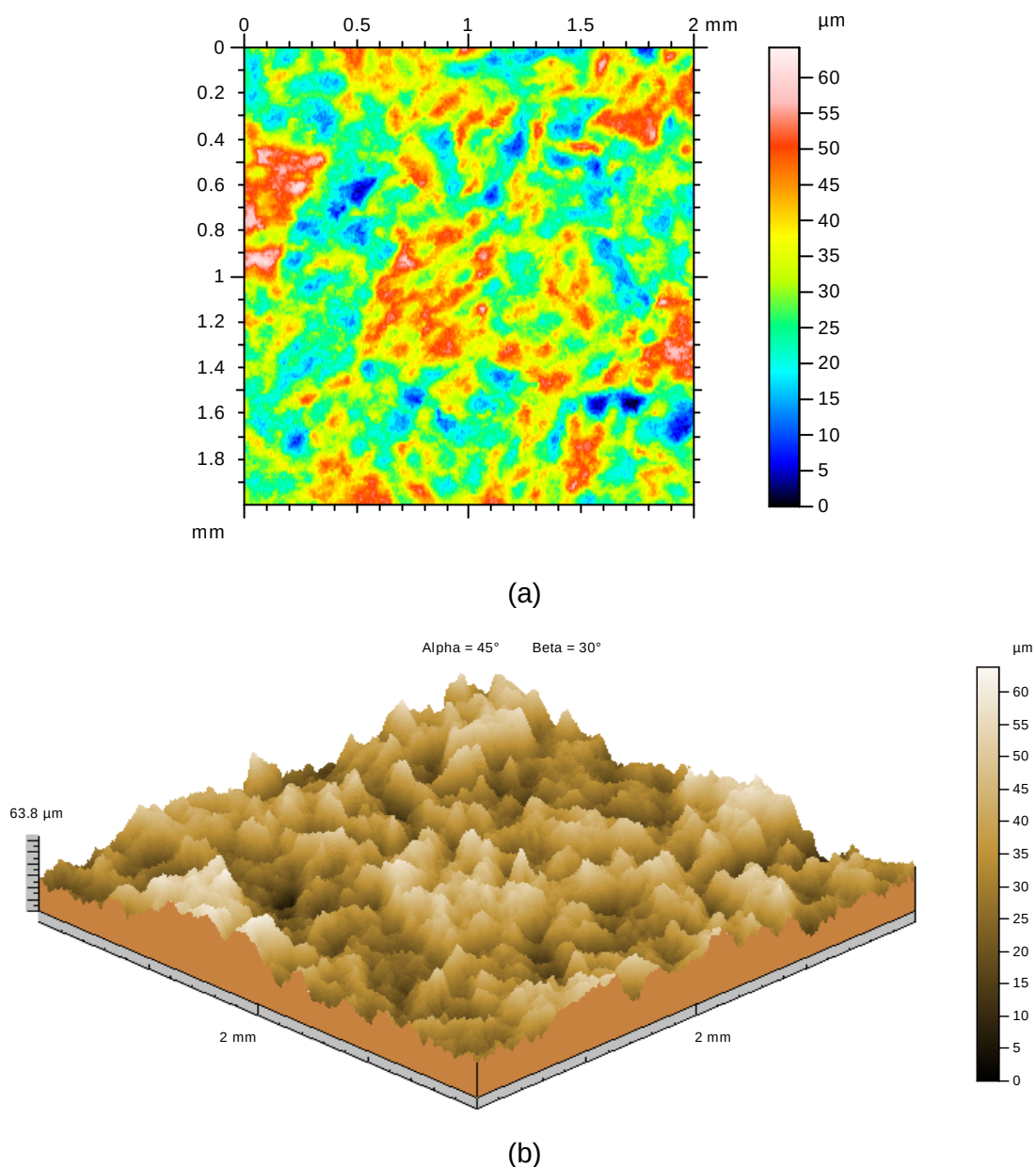


Figura 6.71 – Aspecto topográfico da amostra cavitada DA5, (a) diagrama de nível e (b) topografia tridimensional

A Figura 6.72 (a) e (b) apresenta o perfil de rugosidade na região central de medição para a direção leste-oeste e norte-sul da amostra DA5. O perfil da seção longitudinal cavitada é apresentado na Fig. 6.72 (c). A Tabela 6.38 apresenta os parâmetros de rugosidade para a amostra DA5 cavitada.

Tabela 6.38 – Valores de rugosidade para amostra DA5 cavitada, parâmetros em μm

Local	Sa	Sq	St	Sp	Sv	Ssk	Sku	Figura
A _{Cav}	7,920	9,780	64,300	32,700	31,700	0,235	2,700	6.71

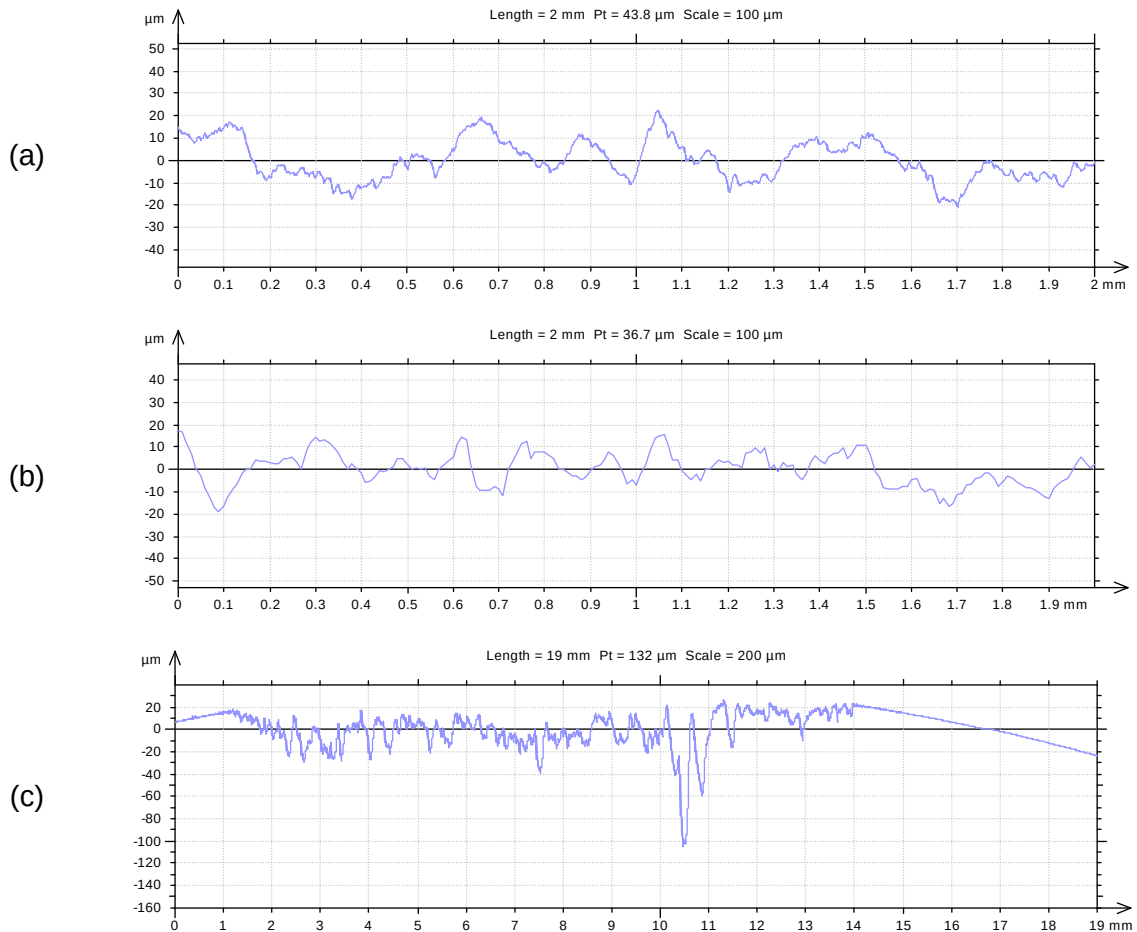


Figura 6.72 – Perfil de rugosidade, (a) leste oeste, (b) norte sul e (c) perfil ao longo do diâmetro da amostra cavitada DA5

Na Figura 6.72 (c), o material apresentou um ponto de vale pronunciado entre o valor de coordenada horizontal de 10 e 11 mm. Este local provavelmente coincide com a transição da região i e ii da Fig. 6.70 (a) com fortes desvios macrogeométricos.

No teste DA5, os parâmetros de rugosidade da Tab. 6.38 foram fortemente afetados pelos desvios macrogeométricos, a começar pelos maiores valores de Sa, Sq e St.

O valor do maior pico (Sp) e o maior vale (Sv) são muito próximos, conforme Tab. 6.38. No caso de Ssk, o seu valor positivo indica a presença de picos com baixa densidade de material. Outra constatação é de que Sku é menor do que 3 (três), apontando que diferentes picos e vales ocorreram numa frequência similar com um achatamento da distribuição.

Allenstein et al. (2014) obtiveram um efeito similar ao de DA5 na superfície das amostras, sendo que as ondulações estavam presentes, mas sem a formação de fendas. No caso de Allenstein (2014), a presença de ondulações e a falta de trincas indica uma evidência importante da capacidade da superfície ser deformada.

Segundo Allestein et al. (2014), a intensa formação de crateras reflete a capacidade do material em absorver a energia de impacto e encerrar a deformação. Consequentemente, quando grandes e profundas crateras estão espalhadas por toda a superfície, são indicativos de uma forte cavitação na amostra, confirmando que a máxima taxa de erosão foi atingida.

No caso do corpo de prova DA5, sua alta perda de massa na cavitação proporcionou uma alteração geral nos parâmetros de rugosidade ao comparar-se com os demais ensaios. Ao analisar a seção longitudinal, nota-se que a presença de vales profundos e isolados afetou diretamente os valores de St e Sku (Fig. 6.72 c).

Portanto, para o corpo de prova DA5 com adição de *Stellite 6*, o desgaste preferencial em uma determinada região do corpo de prova é o principal motivo de sua perda de massa acumulada próximo aos valores encontrados para as amostras em aço inoxidável austenítico (DA4). Logo, não se pode afirmar que a adição de liga *Stellite 21* em DA6 seja vantajosa em termos de taxa de erosão por cavitação, porque em sua superfície provavelmente não ocorreram regiões preferências de desgaste como em DA5.

A Figura 6.73 apresenta o aspecto topográfico da amostra DA6 após a cavitação. Nota-se que existem regiões de picos e vales pronunciados na Fig. 6.73 (b).

Da mesma forma em que na topografia tridimensional estas regiões tornam-se evidentes na Fig. 6.73 (d). Na Figura 6.74, tem-se o perfil linear de rugosidade para as diversas regiões da amostra analisadas e na Tab. 6.39 são apresentados os parâmetros de rugosidade.

Tabela 6.39 – Valores de rugosidade para amostra DA6 para o ensaio de cavitação

Local	Sa	Sq	St	Sp	Sv	Ssk	Sku	Figura
A _{Cav}	1,790	2,310	26,900	12,100	14,800	-0,012	3,690	6.73 (d)

A perda de massa acumulada e a taxa de erosão para a amostra DA6 foram as menores, assim como os valores de Sa e Sq nos ensaios de cavitação. Os valores de Ssk próximo a zero e Sku em torno de 3 (três) indicam que a distribuição é muito próxima a normal.

Nota-se que a amostra DA6 com adição de *Stellite 21* tenha um depósito com microestrutura uniforme, sem a presença de regiões tão fortemente afetadas pelo desgaste.

Entretanto, ainda é possível notar alguns relevos e vales pronunciados na Fig. 6.73 e 6.74 que provavelmente não afetaram de forma significativa a perda de massa.

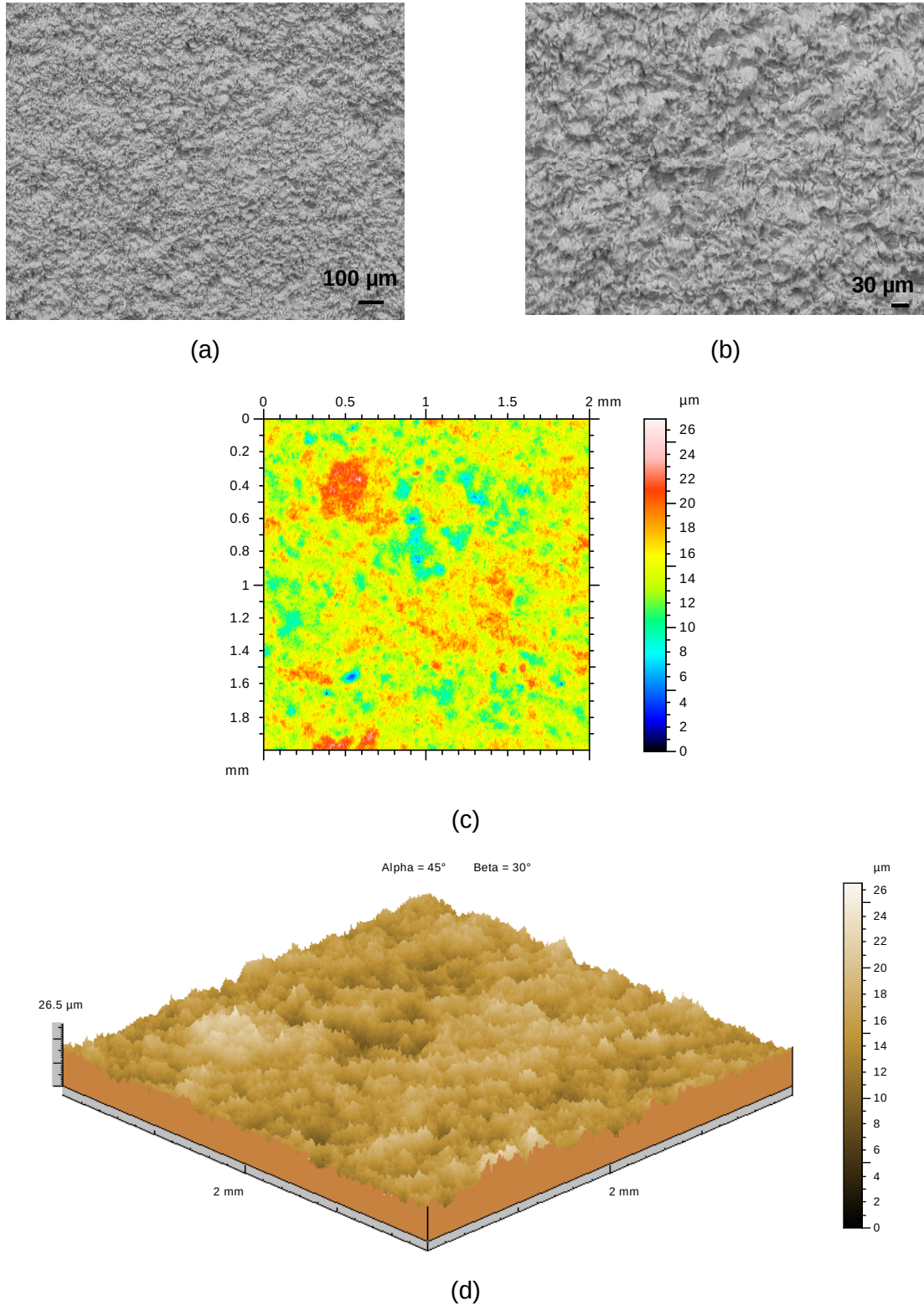


Figura 6.73 – Aspecto topográfico da amostra cavitada DA6, (a) e (b) MEV (c) diagrama de nível e (d) topografia tridimensional

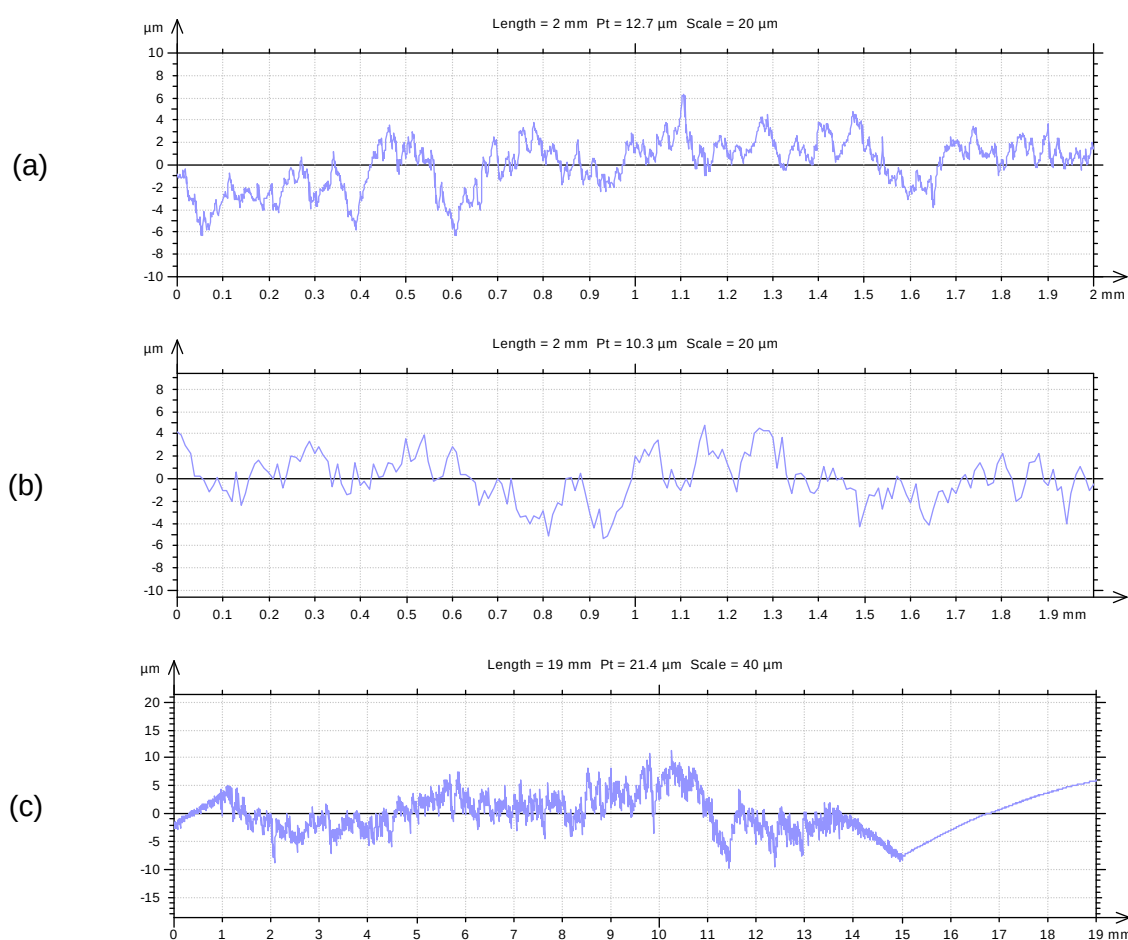


Figura 6.74 – Perfil de rugosidade, (a) leste oeste, (b) norte sul e (c) perfil ao longo do diâmetro da amostra cavitada DA6

Os parâmetros de rugosidade gerais na cavitação são apresentados na Fig. 6.75 a 6.79, considerando a avaliação da área total por ser um parâmetro com maior precisão.

Na Figura 6.75, percebe-se claramente a influência do desgaste preferencial observado por DA5, com um valor muito elevado para S_a e S_q . Com relação a estes parâmetros, o maior desgaste por cavitação afetou seus valores no sentido de amplificá-los, como é o caso claramente visível de DA5 e menos pronunciado em AF4.

Para o valor da soma dos maiores picos e vales (S_t), a Fig. 6.76 destaca novamente os elevados valores observados para DA5. Ao avaliar as amostras nota-se que os vales são pronunciados em relação aos picos, exceto para DA5.

Nota-se que os parâmetros S_a , S_q e S_t apresentam um desempenho próximo para os ensaios DA6, AF3 e AF4 (Fig. 6.75 e 6.76). O ensaio DA5 ficou posicionado em uma região específica com valores de rugosidade absolutos superiores, em função de seu desgaste preferencial com elevada perda de massa acumulada.

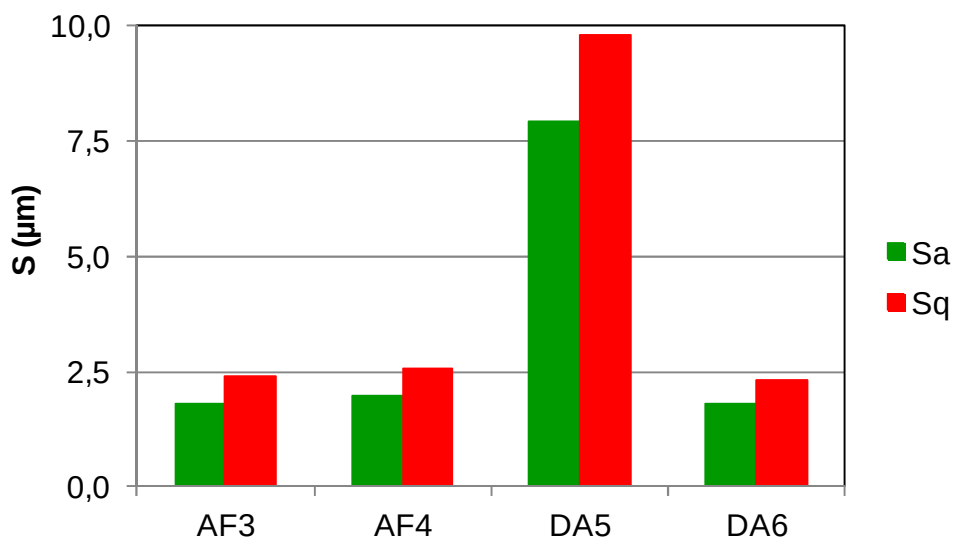


Figura 6.75 – Parâmetro Sa desvio médio aritmético do perfil e Sq desvio médio quadrático

O fator de assimetria é apresentado na Fig. 6.77, com um desempenho negativo para as amostras AF3, AF4 e DA6, ou seja, um perfil do tipo platô. Para DA5, a assimetria positiva é decorrente da presença de picos pronunciados, na região de desgaste excessivo.

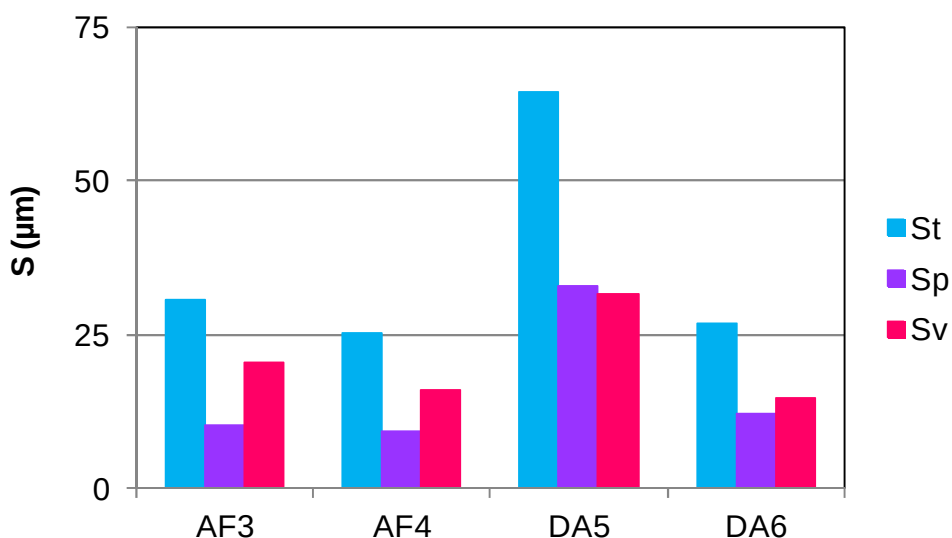


Figura 6.76 – Parâmetro St - soma dos maiores picos do perfil e maiores vales, Sp - a maior altura do pico e Sv - maior profundidade do vale.

Com relação ao parâmetro Ssk (Fig. 6.77), nota-se que os valores de AF3 e AF4 possuem assimetria negativa e os maiores valores absolutos. No caso do ensaio DA5, o parâmetro Ssk possui uma assimetria positiva e DA6 tende ao valor zero. Acredita-se que, para os ensaios soldados pelo processo MIG/MAG duplo arame série com as ligas de cobalto, existe uma propensão a uma assimetria positiva com picos de baixa densidade de

material (Fig. 6.77), devido a sua menor taxa de erosão por cavitação, quando comparado aos demais processos de soldagem.

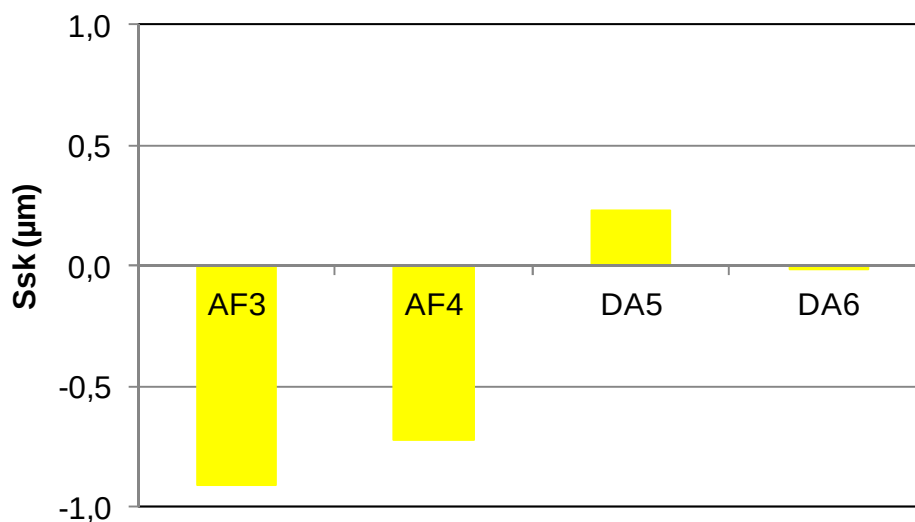


Figura 6.77 – Parâmetro Ssk fator de assimetria

O valor do parâmetro Sku , achatamento do perfil, é apresentado na Fig. 6.78. No caso, o menor valor para a amostra DA5 demonstra que os pico e vales ocorreram de forma constante na amostra. Provavelmente, a presença de alguns vales isolados e de grande profundidade afetou o valor de Sku para AF3 na Fig. 6.78. Como era de se esperar relacionado à baixa taxa de erosão por cavitação e um perfil uniforme de picos e vales, a amostra DA6 tende a apresentar uma distribuição normal com o menor valor de Sku .

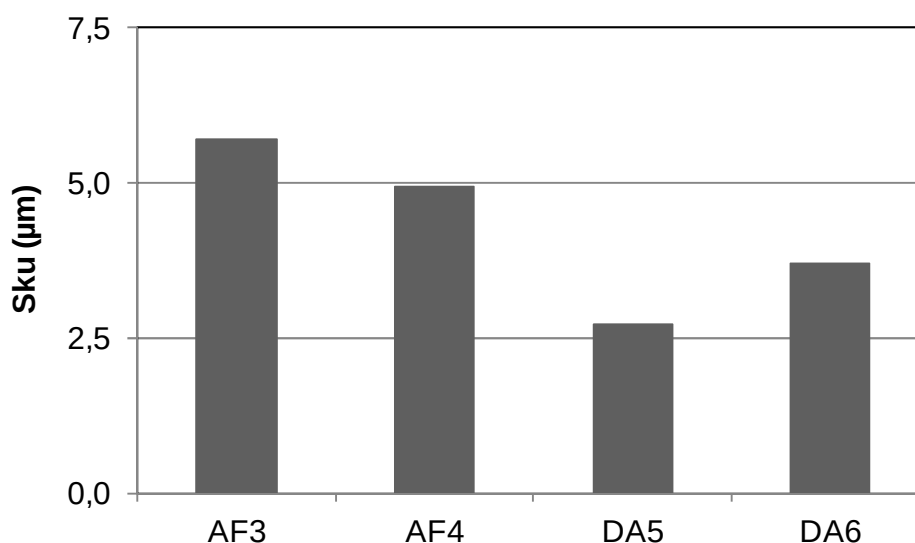


Figura 6.78 – Parâmetro Sku fator de achatamento do perfil avaliado (kurtosis)

O espaço morfológico na Fig. 6.79 forneceu uma boa ilustração da resistência à erosão por cavitação e das mudanças que ocorrem na topografia em função do tempo de ensaio de materiais submetidos à cavitação. Avaliando o espaço morfológico nota-se que os corpos de prova AF3 e AF4 estão próximos das características iniciais do corpo de prova preparado para a cavitação.

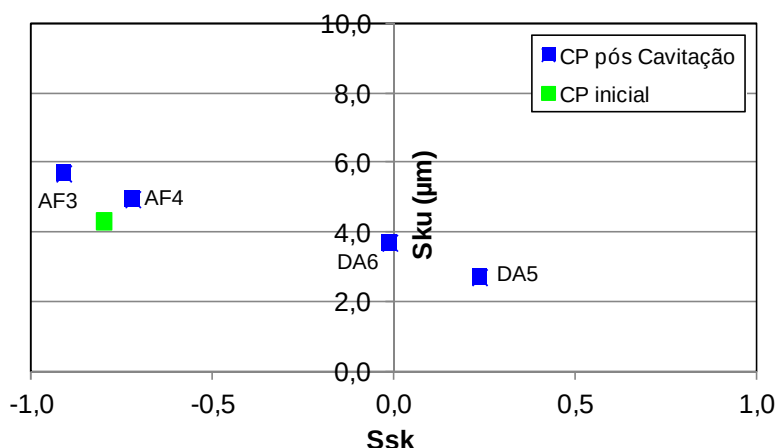


Figura 6.79 - Parâmetro Ssk fator de assimetria e Sku fator de achatamento do perfil avaliado (kurtosis) para cavitação

De Mello (1985) identificou, para o desgaste abrasivo a três corpos, que os menores domínios no espaço morfológico correspondem às menores taxas de desgaste. Nota-se, na Fig. 6.79, um menor espaço morfológico percorrido nas amostras AF3 e AF4. Tendo em vista o maior desgaste de DA5, ocorreu um maior afastamento da condição inicial. No corpo de prova DA6, ou seja, com o melhor desempenho a cavitação, houve um afastamento considerável da amostra inicial na Fig. 6.79, provavelmente influenciado por sua topografia tendendo a uma distribuição normal, com ausência de picos e vales isolados.

Com relação à cavitação, fica evidente que a dureza inicial do corpo de prova não é o fator principal a influenciar na sua resistência, como acontece na erosão em incidência normal. Como apresentado na Tab. 6.25, o corpo de prova DA6, soldado com *Stellite 21*, possui a menor dureza superficial ($H = 251 \text{ kgf/mm}^2$) dos corpos de prova ensaiados. Entretanto, apresentou a menor taxa de erosão por cavitação. Por outro lado, o corpo de prova AF4 com a maior dureza ($H = 284 \text{ kgf/mm}^2$) tem um desempenho inferior a AF3 ($H = 264 \text{ kgf/mm}^2$), sendo um dos corpos de prova com maior desgaste por cavitação.

Fica claro também que o corpo de prova AF3, com alto desgaste em erosão provavelmente afetado pela presença do *Stellite 6*, possui baixa perda de massa por cavitação. Nota-se no processo MIG/MAG arame frio que a adição de *Stellite 21*

proporcionou baixa perda de massa em AF4 na erosão, enquanto que o *Stellite 6* (presente em AF3) provavelmente seja mais resistentes à cavitação. Tal tendência não se comprovou na cavitação em MIG/MAG duplo arame devido à região com desgaste preferencial de DA5 elevando sua taxa de cavitação.

6.6. Comentários Finais

- A soldagem com o processo MIG/MAG arame frio na posição horizontal com metal de adição energizado em aço inoxidável austenítico e o arame frio em liga de cobalto apresentou um aspecto superficial adequado, com rendimento de deposição acima de 90%, sendo uma alternativa satisfatória para a soldagem de revestimento.
- Em todos os casos, a presença de liga de cobalto no arame eletrodo altera a dinâmica da poça de fusão, não apresentando um cordão com a mesma regularidade do aço inoxidável austenítico.
- O processo MIG/MAG duplo arame paralelo e série na posição plana combinando aço inoxidável austenítico e ligas de cobalto tem um comportamento diferenciado em relação à utilização de metais de adição de mesma composição. Tornam-se evidentes os benefícios do uso da combinação de metal de adição no sentido de diminuir o desgaste. Entretanto, é necessário aprofundar o entendimento sobre a característica do arco e da poça de fusão. Acredita-se que os fenômenos envolvendo a atração magnética dos arcos atuem desviando somente o aço inoxidável austenítico, gerando uma poça de fusão de certa forma instável e heterogênea.
- A erosão comprova o benefício do uso de metal de adição com combinação de aço inoxidável austenítico e liga de cobalto que, em função das condições de soldagem, pode alcançar um desempenho muito superior. Uma das hipóteses é de que a dureza elevada alcançada pela superfície com a presença do cobalto, principalmente ao utilizar o *Stellite 21*, forneça uma maior resistência mecânica, reduzindo o desgaste. Notou-se que os revestimentos soldados com a combinação de aço inoxidável austenítico e liga de cobalto *Stellite 21* tendem a apresentar um desempenho superior à erosão, independentemente do processo de soldagem utilizado.
- O processo de soldagem MIG/MAG duplo arame paralelo e série apresentaram as maiores resistências à perda de massa na erosão. Este é um indicativo de que uma maior energia de soldagem destes processos provavelmente proporcione uma alteração microestrutural significativa, com uma dureza maior no revestimento, consequentemente, com uma redução do desgaste na erosão.

- Na erosão, os parâmetros de rugosidade tiveram desempenhos próximos em todos os ensaios. Também não é possível correlacionar diretamente os parâmetros de rugosidade com a perda de massa ou taxa de erosão, sendo este fato atribuído à grande heterogeneidade da superfície do revestimento.
- A resistência à cavitação tornou-se superior ao combinar o aço inoxidável austenítico com a liga de cobalto *Stellite 21*. Tal desempenho para 20 horas chegou a 23% dos valores observados para ambos os arames em aço inoxidável austenítico. Com isso, a perda de massa observada para 40 horas neste ensaio foi menor do que a observada para os arames em aço inoxidável austenítico em 20 horas.
- Ao comparar o desempenho na cavitação da combinação de aço inoxidável austenítico e a liga de cobalto *Stellite 6*, acredita-se que o resultado seja ainda melhor em termos de resistência ao desgaste. Tal fato foi claramente comprovado no processo MIG/MAG arame frio para os ensaios de cavitação.
- Por fim, os parâmetros de rugosidade indicam que uma baixa perda de massa no ensaio de cavitação gerou amplitudes de picos e vales tendendo a seguir uma distribuição normal e com menores espaços morfológicos.
- Não é possível relacionar a erosão e cavitação, como demonstrado no caso das amostras AF3 e AF4 para a combinação de aço inoxidável austenítico e ligas de cobalto. O desgaste presente na erosão pura é fortemente afetado pela dureza superficial e consequentemente o revestimento composto por *Stellite 21* apresenta vantagem na redução do desgaste. Na cavitação, de forma contrária, a presença de *Stellite 6* é a mais vantajosa em termos de menor perda de massa. Tais evidências poderão ser comprovadas no próximo capítulo, em que serão soldados revestimentos somente com as combinações em liga de cobalto.

CAPÍTULO VII

AVALIAÇÃO DO REVESTIMENTO EM LIGAS DE COBALTO

Neste capítulo, são apresentadas e discutidas as análises das características geométricas, econômicas, metalúrgicas, propriedades mecânicas e ensaios tribológicos para as condições de soldagem em processo MIG/MAG com múltiplos arames, usando combinações em ligas de cobalto.

O objetivo é avaliar a influência da combinação do metal de adição em ligas de cobalto, na soldagem de revestimento em chapas de aço carbono, para em seguida submeter estes corpos de prova a ensaios de erosão pura e cavitacional.

Após a avaliação da soldagem das chapas de teste, é apresentado o estudo sobre o desgaste para erosão pura e cavitação. Visa-se a avaliar os corpos de prova em termos de resistência à perda de massa, para em seguida caracterizar a superfície erodida. Nesta fase, a avaliação consiste na determinação de dureza e topografia superficial.

7.1. Soldagem dos revestimentos

Foram realizados os ensaios em ligas de cobalto usando os parâmetros idênticos aos dos testes anteriores para as condições de soldagem e posições estudadas. Apesar da variabilidade do arco devido à alteração do metal de adição, para o processo MIG/MAG arame frio e MIG/MAG duplo arame série, é possível obter cordões de solda aceitáveis. Para a cavitação, somente as condições de soldagem em MIG/MAG arame frio proporcionaram cordões de solda com características geométricas adequadas para a construção dos corpos de prova. A seguir, será discutida a soldabilidade dos revestimentos de soldagem realizados em cada processo.

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

Visando usar a experiência da soldagem com aço inoxidável austenítico, mantiveram-se as condições de soldagem com parâmetros idênticos aos dos testes AF1 à AF4 do Capítulo V. A Tabela 7.1 apresenta a proposta dos ensaios em MIG/MAG arame frio, sendo a soldagem em MIG/MAG convencional no teste AF7 somente com a liga *Stellite 21*, devido à tendência deste metal de adição apresentar um melhor desempenho na erosão pura.

Tabela 7.1 – Ensaios MIG/MAG arame frio horizontal, DBCP = 17 mm

CS	U (V)	V _{alim} (m/min)	V _{alim} AF (m/min)	V _{sold} (cm/min)	Metal adição energizado	Arame Frio
AF5	23	7,5	1	60	<i>Stellite 6</i>	<i>Stellite 21</i>
AF6	23	7,5	1	60	<i>Stellite 21</i>	<i>Stellite 6</i>
AF7	23	7,5	-	60	<i>Stellite 21</i>	-

A Tabela 7.2 traz os resultados obtidos para as condições de soldagem ajustadas com os respectivos valores médios e eficazes das correntes e tensões.

Tabela 7.2 – Parâmetros 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)
AF5	1	226,64	220,82	20,54	20,04	AF6	1	224,42	218,93	19,55	18,99
	2	222,20	217,03	20,59	20,20		2	222,39	217,20	19,66	19,25
	3	222,64	217,37	20,62	20,21		3	224,16	218,77	19,79	19,72
	4	225,67	220,16	20,51	20,07		4	224,98	219,51	19,65	19,28
	5	224,29	218,85	19,49	19,47		5	225,47	219,84	19,59	19,14
AF7	1	223,41	218,93	20,09	19,52						
	2	218,30	212,44	20,18	19,74						
	3	219,02	212,85	20,17	19,74						
	4	223,28	217,99	20,27	19,89						
	5	224,57	218,77	20,14	19,63						

Na condição de soldagem AF7 da Tab. 7.1 e 7.2, foi soldado o corpo de prova pelo processo MIG/MAG convencional, usando os parâmetros de soldagem iguais aos ajustados para os demais ensaios. Em todos os corpos de prova, adotou-se a configuração de ângulo da tocha de soldagem e injetor de arame frio em 80° (detalhe do ajuste na Fig. 4.6). Manteve-se o tecimento da tocha de soldagem em 1,5 Hz com amplitude de 5 mm,

conforme os testes P33 e P34 do capítulo anterior. A Figura 7.1 mostra o aspecto dos cordões de solda obtidos para os ensaios AF5 à AF7.

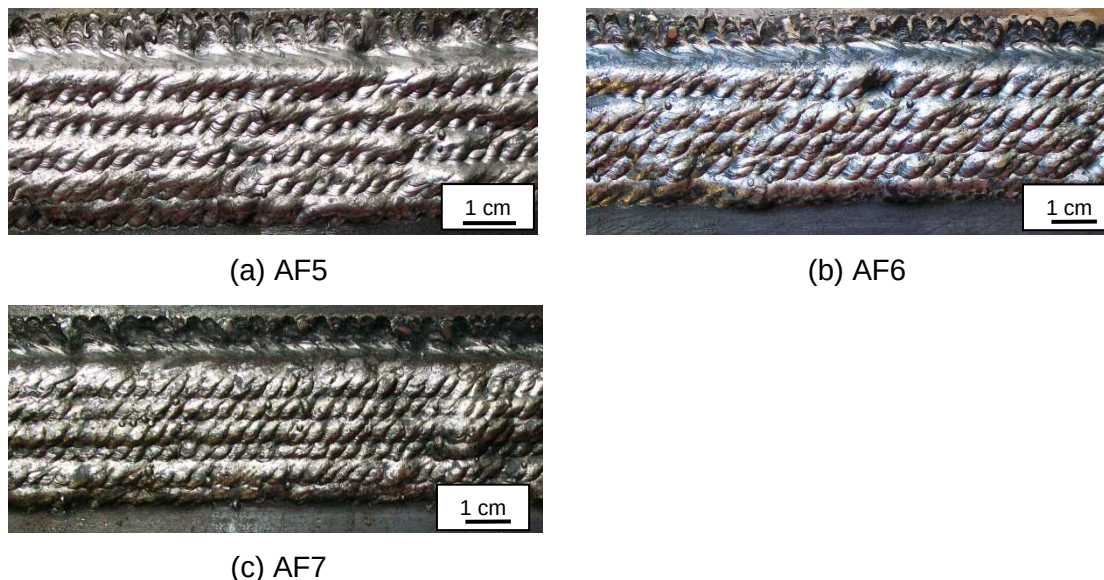


Figura 7.1 – Condições de soldagem para o processo MIG/MAG com adição de ligas de cobalto

De forma geral, os cordões de solda apresentaram bom aspecto superficial, com isto foi possível a retirada dos corpos de prova, para os ensaios subsequentes de erosão pura e cavitacional. Em termos de seção transversal e característica superficial do revestimento, não ocorreram alterações significativas no depósito em relação à soldagem com aço inoxidável.

Com relação às características geométricas e rendimento de deposição, os resultados são apresentados na Tab. 7.3.

Em termos de rendimento de deposição, os valores estão entre 92 e 96% dentro do esperado para o processo MIG/MAG e compatíveis com os demais ensaios. A diluição variou na faixa de 18% a 23%, sendo estes os maiores valores observados ao comparar com AF1 à AF4, soldados pelo processo MIG/MAG arame frio na posição horizontal, apresentado nos Capítulo V e VI itens 5.1.1 e 6.1.1.

A soldagem do ensaio AF7 em MIG/MAG convencional com uma diluição de 20% demonstra que provavelmente para condições de soldagem idênticas existe um efeito da liga de cobalto em aumentar a participação do metal de base no depósito.

A Figura 7.2 ilustra as seções transversais dos revestimentos em ligas de cobalto. Conforme mostrado no Capítulo III, a distância adotada entre passes foi de 3 mm.

Tabela 7.3 - Resultados das características geométricas gerais e rendimento de deposição

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 (%)
AF5	0,073	92,73	1,652	34,650	6,120	0,18	1,652	34,870	191,69	18,19
IN _{AF5}	-	-	0,017	0,034	0,139	-	0,017	2,180	2,180	-
AF6	0,070	96,00	1,490	35,815	7,032	0,20	1,491	45,290	196,34	23,07
IN _{AF6}	-	-	0,018	0,351	0,070	-	0,018	2,190	3,120	-
AF7	0,071	96,00	2,485	36,067	8,650	0,24	2,485	53,260	261,560	20,36
IN _{AF7}	-	-	0,029	0,354	0,085	-	0,029	2,920	1,890	-

* E - energia de soldagem; Rend - rendimento de Deposição; p - penetração; L - largura; R - reforço; $h_{\text{útil}}$ - altura útil; A_p - área penetração; A_R - área reforço; Dil - diluição

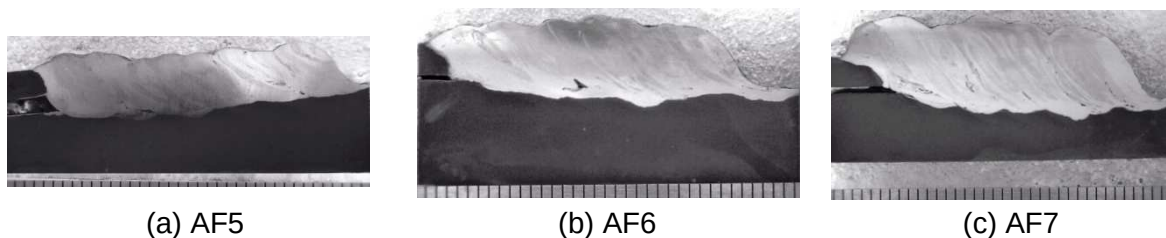


Figura 7.2 – Seção transversal dos revestimentos soldados em MIG/MAG arame frio e convencional (escala em mm)

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

No processo MIG/MAG duplo arame paralelo, propõe-se a realização de dois ensaios, combinando as ligas de cobalto *Stellite 6* e *21*. A Tabela 7.4 apresenta os ensaios idealizados para este procedimento de soldagem. A velocidade de alimentação (V_{alim}) da Tab. 7.4 na condição de soldagem DA7 foi alternada entre 12 m/min e 14 m/min, visando a eliminar a presença de *humps*. Conforme indicado no item 3.3 do Capítulo III, a distância para os cordão de solda é de 1 mm em relação ao passe anterior.

Na Tabela 7.5, são mostradas as respostas em termos de parâmetros elétricos obtidos nos experimentos com MIG/MAG duplo arame paralelo.

Tabela 7.4 – Condições de soldagem em MIG/MAG duplo arame paralelo

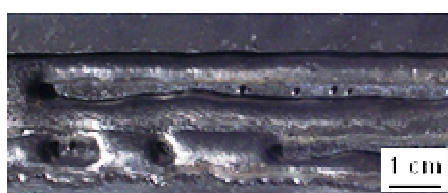
CS	U (V)	V_{alim} (m/min)	V_{sold} (cm/min)	Arame 1 (Mestre)	Arame 2 (Escravo)
DA7	30	12/14	60	Stellite21	Stellite6
DA8	30	12	60	Stellite6	Stellite21

Tabela 7.5 – Parâmetros 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 _{alim 1}	V _{sold}	NC	I _{ef 1}	I _{ef 2}	I _{m1}	I _{m2}	U _{ef1}	U _{ef2}	U _{m1}	U _{m2}
	V _{alim 2}			(A)	(A)	(A)	(A)	(V)	(V)	(V)	(V)
DA7*	12	60	1	249,04	242,33	248,59	242,06	29,93	29,94	29,91	29,93
	14		2	264,99	273,76	267,39	273,58	30,01	29,93	29,95	29,93
DA8*	12	50	1	242,45	249,03	242,12	248,80	29,93	30,00	29,92	29,97

* CS – Condições de soldagem não satisfatórias

Nas condições de soldagem DA7 e DA8, não foi possível obter um cordão de solda regular, sem possibilidade de execução dos 3 passes de revestimento. Para maiores esclarecimentos sobre as irregularidades, a Fig. 7.3 apresenta os cordões com *humps* (Fig. 7.3 a) ou totalmente afastados (Fig. 7.3 b).



(a) DA7



(b) DA8

Figura 7.3 – Ensaio MIG/MAG duplo arame paralelo para metal de adição *Stellite 6* e *21*

Com a combinação dos dois arames em liga de cobalto, houve uma ausência de atração do arco com um afastamento suficiente para formar cordões distintos (Fig. 7.3 b). Nas condições de soldagem da chapa de teste DA7 da Fig. 7.3 (a), além do problema de distanciamento entre os cordões, ao notar a ocorrência dos *humps*, procurou-se aumentar a velocidade de alimentação para 14 m/min. Apesar desta tentativa de alteração dos parâmetros, novamente os cordões formados não foram uniformes.

Uma das prováveis explicações para a separação dos cordões de solda e *humps* durante as condições de soldagens DA7 e DA8 pode estar relacionada à atração dos arcos que não proporcionou uma poça de fusão conjunta com provável repulsão. Além disso, a tocha do MIG/MAG duplo arame não possibilita uma regulagem da distância entre os bicos de contato. Propõe-se uma investigação em trabalhos futuros sobre o efeito dos elementos de liga que podem ocasionar estes fatos.

Devido à ausência de um cordão de solda adequado para os revestimentos, não foi possível a avaliação destes ensaios soldados pelo processo de soldagem MIG/MAG duplo arame paralelo para combinação dos arames em ligas de cobalto. Consequentemente, ficou impossibilitada a avaliação da erosão pura e cavitacional do teste DA7 e DA8 na sequência da tese.

7.1.3. 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 (CS) apresentadas na Tab. 7.6 com as ligas de cobalto sendo alternadas entre o arame mestre e escravo.

Tabela 7.6 – Ensaios 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)
DS5	32	30	14	12	80	<i>Stellite 21</i>	<i>Stellite 6</i>
DS6	32	30	14	12	80	<i>Stellite 6</i>	<i>Stellite 21</i>

A Tabela 7.7 apresenta os parâmetros elétricos ajustados e monitorados durante os experimentos com a combinação de ligas de cobalto em DS5 e DS6. Como mostrado no Capítulo III, procurou-se manter fixa a distância de 1 mm entre os passes consecutivos para o processo MIG/MAG duplo arame série.

Tabela 7.7 – 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 _{sold}	NC	I _{ef1}	I _{ef2}	I _{m1}	I _{m2}	U _{ef1}	U _{ef2}	U _{m1}	U _{m2}
	V _{alim2}			(A)	(A)	(A)	(A)	(V)	(V)	(V)	(V)
DS5	14/12	80	1	259,96	238,37	259,54	237,30	32,06	29,92	32,05	29,84
			2	267,31	243,78	266,94	243,08	32,06	29,86	32,06	29,81
			3	274,65	248,85	274,34	248,85	32,06	29,79	32,06	29,77
DS6	14/12	80	1	266,13	231,81	265,04	225,12	32,09	30,32	32,04	29,89
			2	273,41	252,60	272,68	249,92	32,09	30,02	32,04	29,86
			3	262,76	255,55	261,69	252,99	32,10	29,96	32,04	29,83

Na condição de soldagem DS5 e DS6 com os arames em liga de cobalto, assim como no caso do MIG/MAG duplo arame paralelo, ocorreu instabilidade na poça de fusão, sendo a suspeita de variações na atração entre os arcos.

A Figura 7.4 mostra os cordões de solda obtidos. A tocha de soldagem usada no processo MIG/MAG duplo arame possui uma distância fixa dos bicos de contato, não sendo possíveis alterações visando a eliminar estas ocorrências.

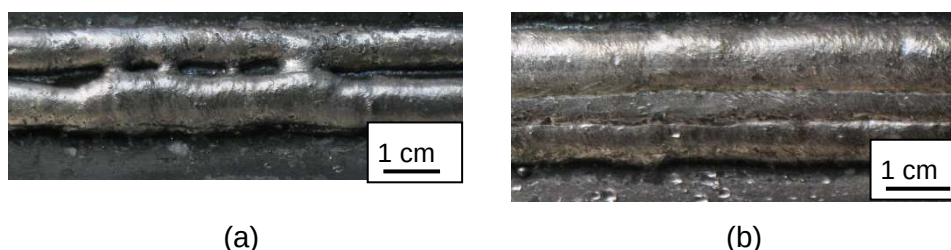


Figura 7.4 – Cordão de solda para o teste (a) DS5 e (b) DS6

Com relação às características geométricas e rendimento de deposição, as regiões dos corpos de prova maciças e sem defeitos foram avaliadas, sendo os resultados apresentados na Tab. 7.8 e a seção transversal mostrada na Fig. 7.5.

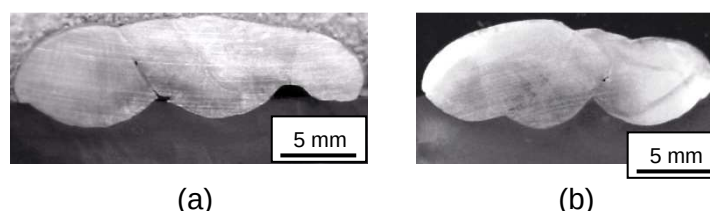


Figura 7.5 – Condição de soldagem (a) DS5 e (b) DS6

Comparando as condições de soldagem e a diluição dos ensaios DS5 e DS6, verifica-se que ocorreram variações superiores à expectativa, com valores respectivamente de 13% e 35%. O fato é atribuído à dinâmica da poça de fusão que foi muito distinta entre os ensaios, ao alternar a composição do arame mestre e escravo.

As condições de soldagem com a presença do metal de adição *Stellite 21* no arame mestre causou grande instabilidade no arco. Invertendo os arames no ensaio DS6, o cordão apresentou-se adequado apesar de estreito e extremamente côncavo. Nota-se na Fig. 7.5 (a) a existência de defeitos de falta de fusão entre os passes na junção com o metal de base.

Tabela 7.8 - Resultados em termos de características geométricas gerais e rendimento de deposição

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 (%)
DS5	0,190	87,75	1,91	23,84	5,89	0,11	4,42	18,40	119,80	13,32
IN _{DS5}	-	-	0,14	0,44	0,12	-	0,28	1,00	1,25	-
DS6	0,203	90,88	2,93	21,35	5,07	0,12	3,38	43,22	81,20	34,75
IN _{DS6}	-	-	0,25	0,24	0,05	-	0,27	0,60	2,02	-

7.2. Ensaios de Erosão

Os corpos de prova soldados pelo processo MIG/MAG arame frio e MIG/MAG duplo arame série foram submetidos à erosão, conforme delineado na Tab. 7.9, totalizando 5 ensaios a serem apresentados e discutidos a seguir.

Tabela 7.9 – Corpos de prova avaliados na erosão pura

CS	Processo de Soldagem	Arame 1	Arame 2
AF5	MIG/MAG arame frio	<i>Stellite 6</i>	<i>Stellite 21</i>
AF6	MIG/MAG arame frio	<i>Stellite 21</i>	<i>Stellite 6</i>
AF7	MIG/MAG convencional	<i>Stellite 21</i>	-
DS5	MIG/MAG duplo arame série	<i>Stellite 21</i>	<i>Stellite 6</i>
DS6	MIG/MAG duplo arame série	<i>Stellite 6</i>	<i>Stellite 21</i>

7.2.1. Ensaios de Erosão em MIG/MAG arame frio

Para o ensaio AF5, os resultados em termos erosão pura são apresentados na Tab. 7.10, sendo mostrados os valores para taxa de erosão (Tx), a perda de massa acumulada (D) e a incerteza expandida associada a medição de massa (IN).

A Figura 7.6 apresenta a evolução do desgaste para a amostra AF5, com os valores obtidos na Tab. D.1 no Apêndice D.

No teste AF5, a erosão pura na Fig. 7.6 (a) progride até os 100 minutos com valor instantâneo próximo a 0,20 mg/min. Ao final do ensaio, existe um aumento do desgaste para aproximadamente 0,30 mg/min. Provavelmente, ocorreu um retardamento na superação da fase de incubação para o estágio final do ensaio, reduzindo a perda de massa acumulada.

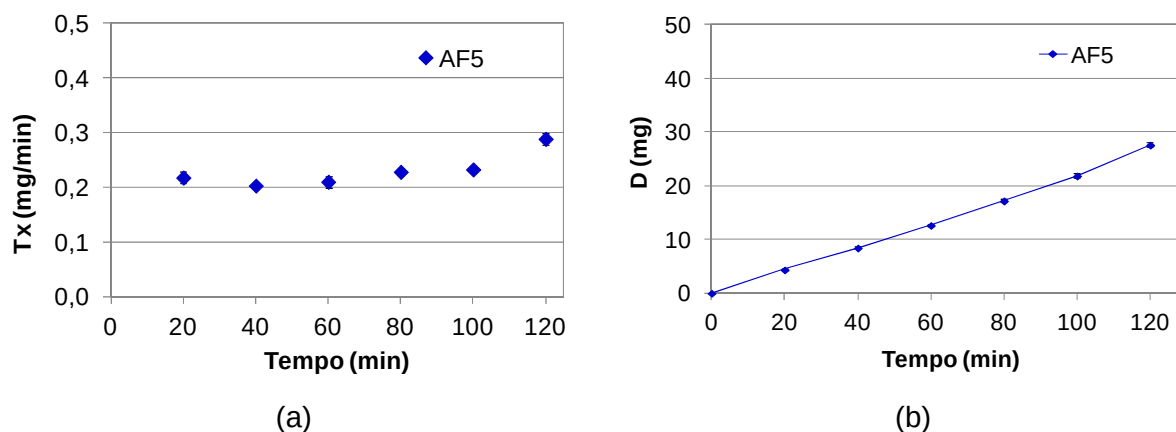


Figura 7.6 – Evolução de (a) taxa de erosão e (b) desgaste para o teste AF5

A Figura 7.7 apresenta a taxa de erosão para o ensaio AF5. Nota-se que o valor de 0,25 mg/min, para AF5 (arame eletrodo em *Stellite 6*), é inferior aos ensaios erosivos apresentados nos capítulos anteriores de AF1 à AF4 (ver Tab. 5.21 e Tab. 6.17). A correlação na Fig. 7.7 é de 99%, indicando ajuste adequado dos dados com uma regressão linear.

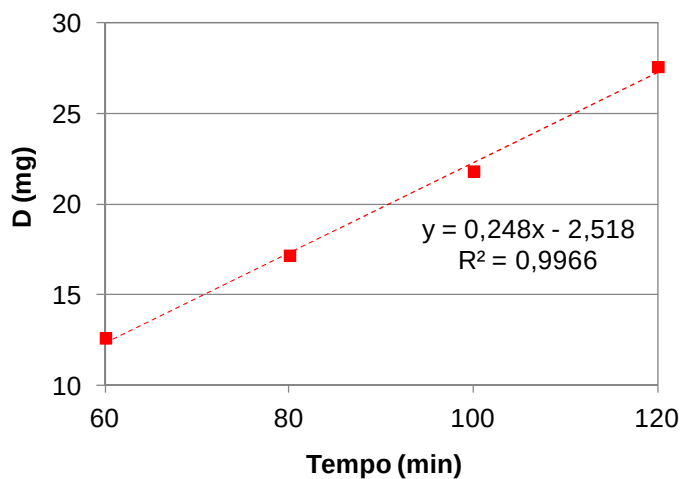


Figura 7.7 – Taxa de erosão para AF5

Na Tabela D.2, no Apêndice D, são apresentados os resultados em termos de erosão para a amostra AF6. O desempenho em relação à taxa de erosão e da perda de massa acumulada de AF6 está na Fig. 7.8. Na Figura 7.9, é apresentada a taxa de erosão média de AF6 após os 60 minutos de ensaio, com valor de 0,18 mg/min. A presença predominante da liga *Stellite 21* no depósito reduziu sensivelmente o desgaste erosivo. Considerando o processo de soldagem MIG/MAG arame frio na posição horizontal, esta combinação proporcionou o melhor desempenho em termos de resistência à erosão.

Como a liga *Stellite 21* possui um baixo teor de carbono, em torno de 0,25%, com 11% de molibdênio, provavelmente a formação de grande volume de carbonetos do tipo Co_3Mo e CoMo_6 contribuiu sensivelmente para o aumento na dureza do corpo de prova e consequentemente na redução do desgaste, assim como observado por Nsoesie et al. (2014).

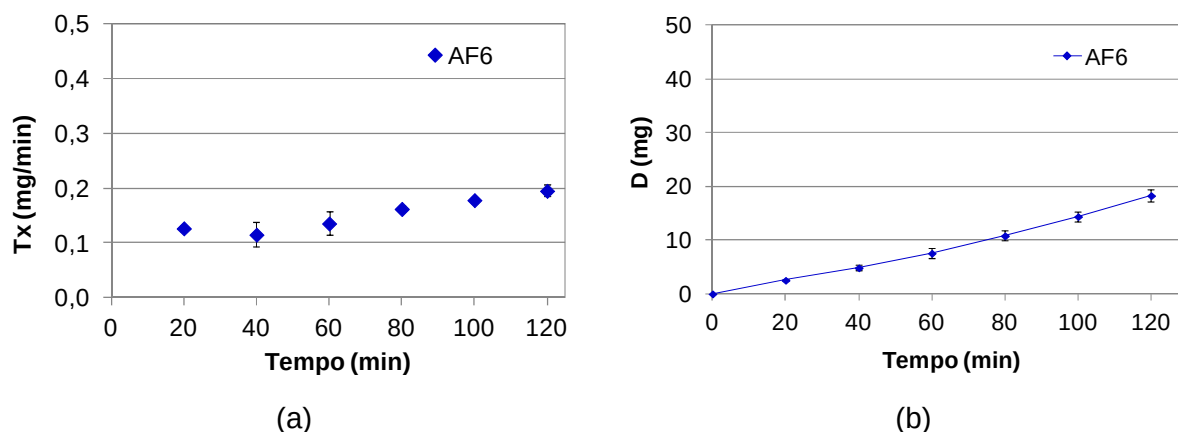


Figura 7.8 – Evolução de (a) taxa de erosão e (b) perda de massa acumulada para o teste AF6

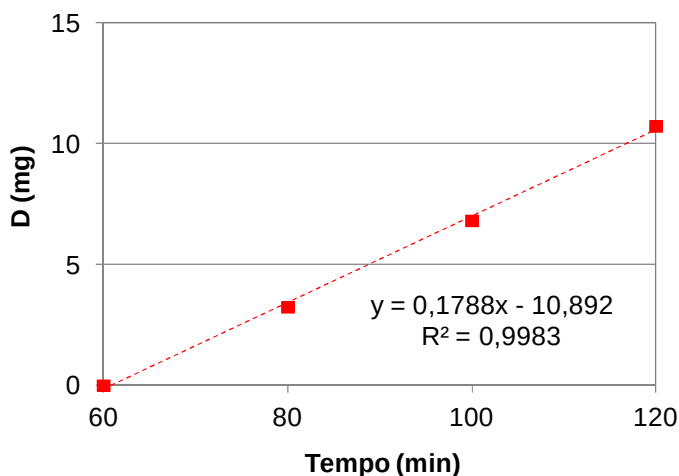


Figura 7.9 – Taxa de erosão para o ensaio AF6

Com intuito de comparar os resultados das ligas de cobalto, propôs-se a avaliação do revestimento AF7 soldado pelo processo MIG/MAG convencional, com uso exclusivamente de *Stellite 21*. A Tabela D.3 apresenta o desempenho à erosão da amostra AF7.

A Figura 7.10 apresenta a taxa de erosão instantânea e a perda de massa acumulada e na Fig. 7.11 tem-se a taxa de erosão média para AF7. Nota-se que o desempenho em relação à erosão pura para a amostra AF7 é a de menor perda de massa dentre as condições de soldagem pelo processo MIG/MAG na posição horizontal.

A taxa de erosão média é de 0,05 mg/min, sendo o melhor resultado entre as amostras soldadas em MIG/MAG arame frio e convencional na posição horizontal. A taxa de erosão é em torno de 10 vezes inferior ao valor obtido para a amostra AF2 em aço inoxidável austenítico, indicando que a presença da liga de cobalto *Stellite 21* reduz drasticamente a perda de massa em erosão.

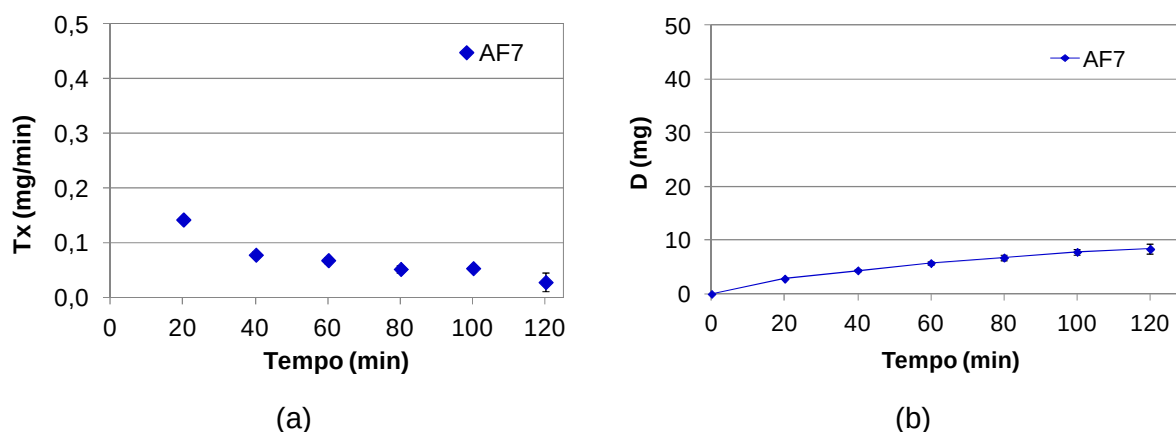


Figura 7.10 – Evolução de (a) taxa de erosão e (b) perda de massa acumulada para AF7

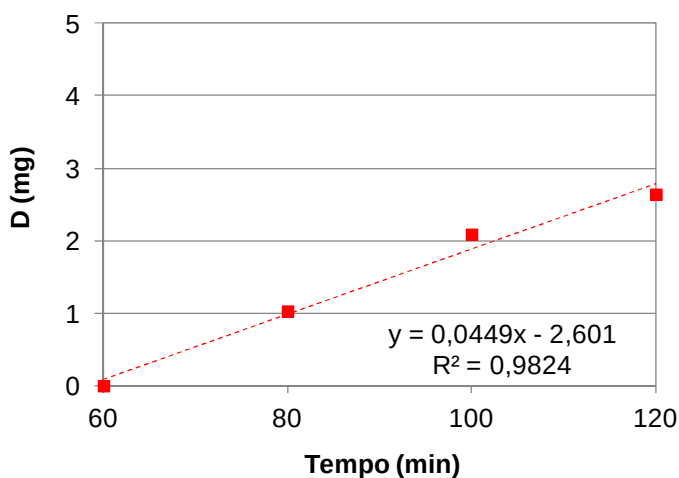


Figura 7.11 – Taxa de erosão para o ensaio AF7

Logo, os resultados obtidos para erosão pura estão de acordo com as tendências observadas por Nsoesie et al. (2014), no qual obteve uma redução de 18% na perda de massa acumulada ao aplicar o *Stellite 21* em comparação com *Stellite 6*.

7.2.2. Ensaios de Erosão Pura em MIG/MAG duplo arame série

As amostras DS5 e DS6 em MIG/MAG duplo arame série foram submetidas ao ensaio de erosão pura, permitindo uma comparação com os resultados do processo MIG/MAG arame frio.

A Tabela D.4 apresenta os valores em termos de perda de massa para o ensaio DS5, com maior adição de *Stellite 21*. A taxa de erosão e a perda de massa acumulada são apresentadas na Fig. 7.12.

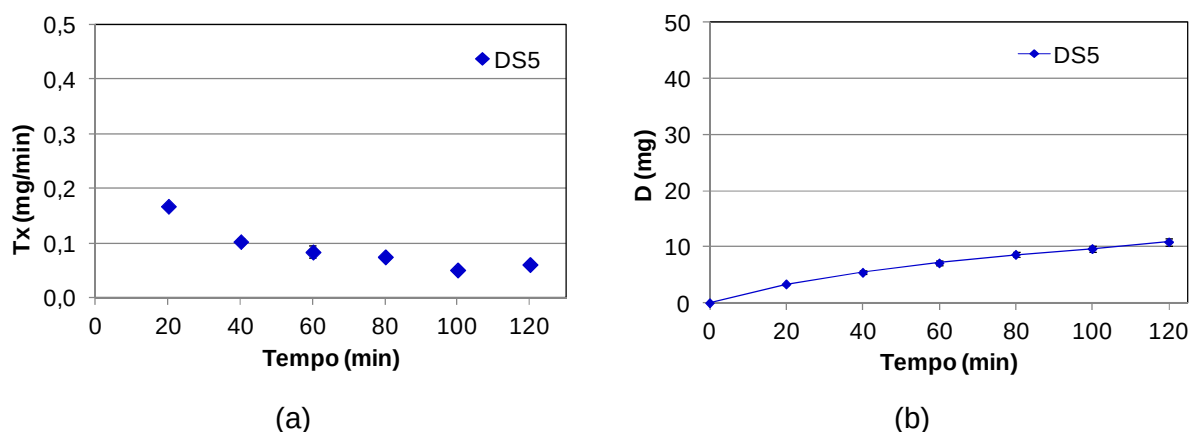


Figura 7.12 – Evolução de (a) taxa de erosão e (b) perda de massa acumulada para o teste DS5

A característica de um ponto com alta perda de massa em 20 minutos do ensaio DS5 (Fig. 7.12 a) é similar ao da amostra AF7 (Fig. 7.10 a).

Na Figura 7.13, a taxa de erosão para DS5 é de 0,06 mg/min com a melhor resistência à perda de massa para o processo MIG/MAG duplo arame série. Este valor é levemente superior ao teste AF7 soldado pelo MIG/MAG convencional.

No ensaio DS6, a liga *Stellite 6* foi usada no arame mestre e *Stellite 21* no escravo. Os resultados em termos de perda de massa foram piores, conforme elevação do desgaste na Tab. D.5. Na Figura 7.14, é apresentado o comportamento da taxa de erosão e da perda de massa acumulada no ensaio DS6.

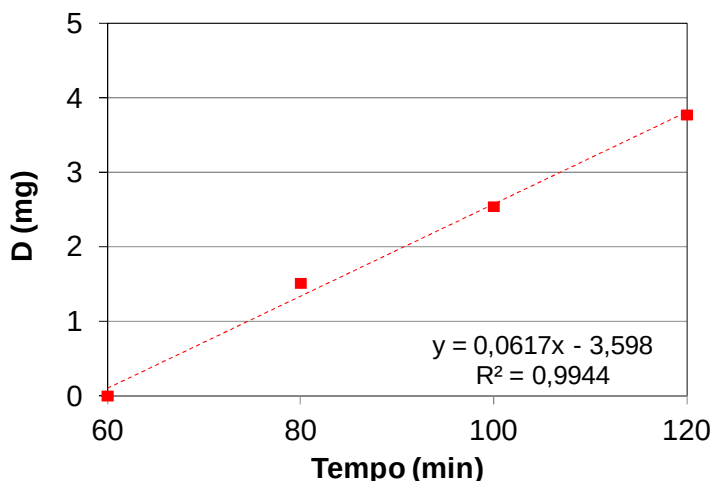


Figura 7.13 – Taxa de erosão para o teste DS5

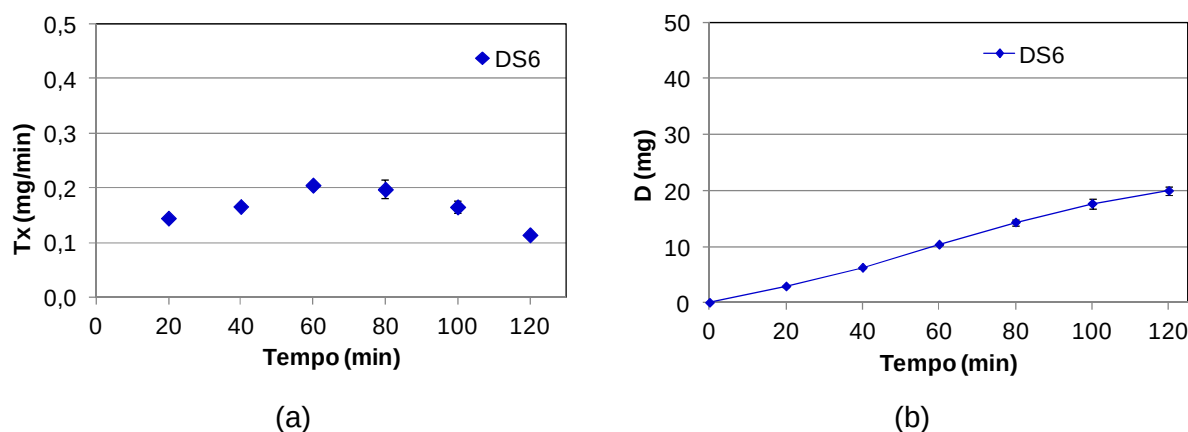


Figura 7.14 – Evolução de (a) taxa de erosão e (b) perda de massa acumulada para o teste DS6

Ao avaliar a perda de massa ao longo do ensaio, ocorreu um declínio somente a partir dos 80 minutos (Fig. 7.14 a), provavelmente devido ao aumento de dureza superficial desta amostra.

Os valores de perda de massa da amostra DS6 são 83% superiores quando comparados com aqueles obtidos para a amostra DS5. A diferença na execução de DS6 e DS5 foi a inversão do arame mestre e escravo com velocidade de alimentação, respectivamente de 14 m/min e 12 m/min. O fato confirma que a presença em maior quantidade de *Stellite 21* no depósito proporciona uma redução sensível no desgaste por erosão pura.

A taxa de erosão de DS6 está na Fig. 7.15 com valor de 0,16 mg/min. O valor da taxa de erosão média é superior à amostra DS5 e AF7. Entretanto, mostra-se muito próximo de AF6 soldado com MIG/MAG arame frio com combinação idêntica de arames.

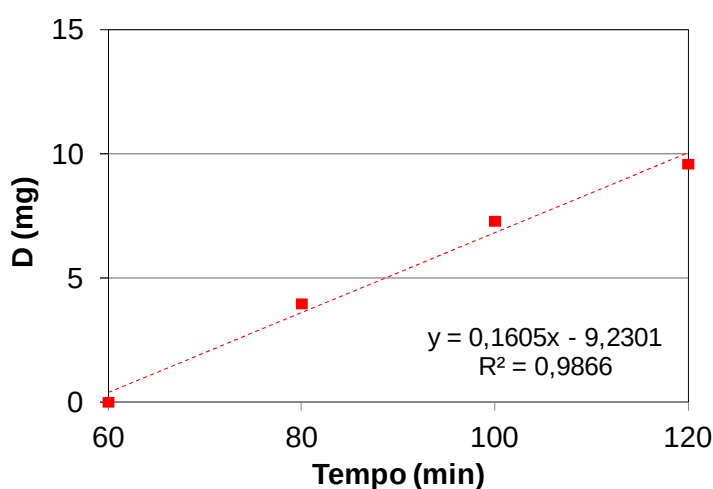


Figura 7.15 – Taxa de erosão para o teste DS6

7.2.3. Análise Geral dos Ensaios de Erosão

O processo de soldagem MIG/MAG arame frio na posição horizontal proporcionou as melhores características dos revestimentos ao usar as ligas de cobalto, propondo-se uma comparação geral dos resultados. A Tabela 7.10 apresenta os valores em termos de perda de massa acumulada e taxa de erosão.

Tabela 7.10 – Resultados em termos de perda de massa acumulada e taxa de erosão para o processo MIG/MAG arame frio

Amostra	AF1	AF2	AF3	AF4	AF5	AF6	AF7
Material	308+308	308+308	308+6Co	308+21Co	6Co+21Co	21Co+6Co	21Co
Dil (%)	13,46	13,16	16,72	16,62	18,19	23,07	20,36
D (mg)	36,78	48,51	43,21	31,09	27,59	18,30	8,38
Tx _{1-2h} (mg/min)	0,36	0,42	0,36	0,28	0,25	0,18	0,05

Ao comparar no processo MIG/MAG arame frio as amostras AF2 e AF6, respectivamente a condição mais desfavorável e o melhor resultado em termos de desgaste, nota-se uma variação de 265% na perda de massa. Fica evidente que o depósito com a presença da liga de cobalto *Stellite 21* proporciona sensível redução na perda de massa. Ao usar somente o depósito em *Stellite 21* no processo MIG/MAG convencional, os resultados são ainda melhores com uma variação de 578% entre AF2 e AF7.

Da mesma forma, ao adicionar em pequenas quantidades a liga cobalto *Stellite 21* no revestimento como em AF4, sua vantagem é novamente percebida. Ao comparar os resultados de AF3 e AF4 com adição de *Stellite 6* e *Stellite 21* respectivamente no arame frio, a diferença é de 38%. Os valores de AF2 com aço inoxidável austenítico são 56% superiores à AF4, no qual se acrescentou apenas 1 m/min de arame frio de liga em *Stellite 21*.

Na Figura 7.16, têm-se todos os resultados dos ensaios com MIG/MAG arame frio, avaliados em termos de taxa de erosão. Com a presença somente das ligas de cobalto no revestimento, a taxa de erosão tende a manter-se inferior em todos os estágios. Em especial, destacam-se as amostras AF6 e AF7 com desempenho vantajoso em relação aos demais ensaios. A tendência para o ensaio AF7 é de redução na perda de massa ao longo da erosão pura, indicando provavelmente um aumento da resistência mecânica na camada endurecida.

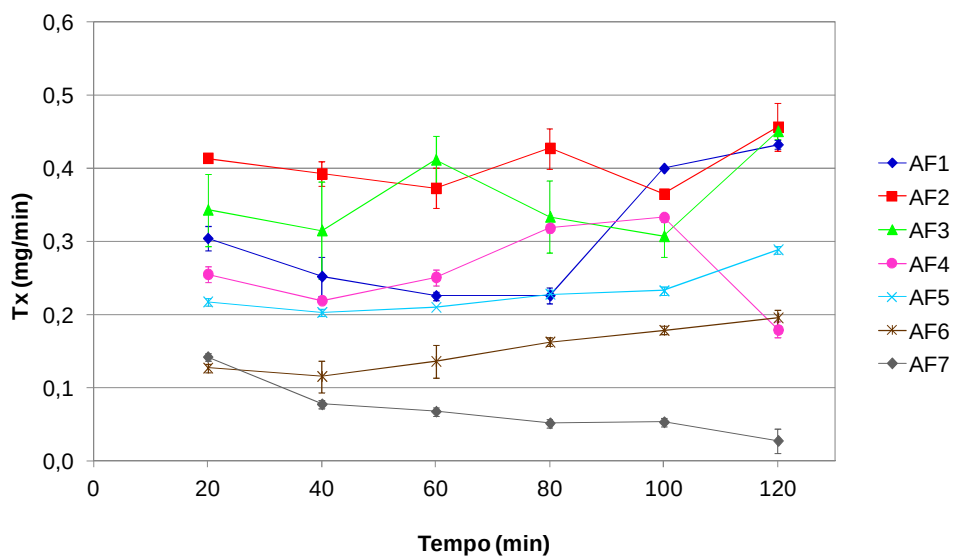


Figura 7.16 – Taxa de erosão para o processo MIG/MAG arame frio

A Figura 7.17 apresenta os resultados em termos de perda de massa acumulada. Com o uso da liga de cobalto no arame energizado e/ou frio, a característica das curvas de desgaste é de sensível redução da perda de massa.

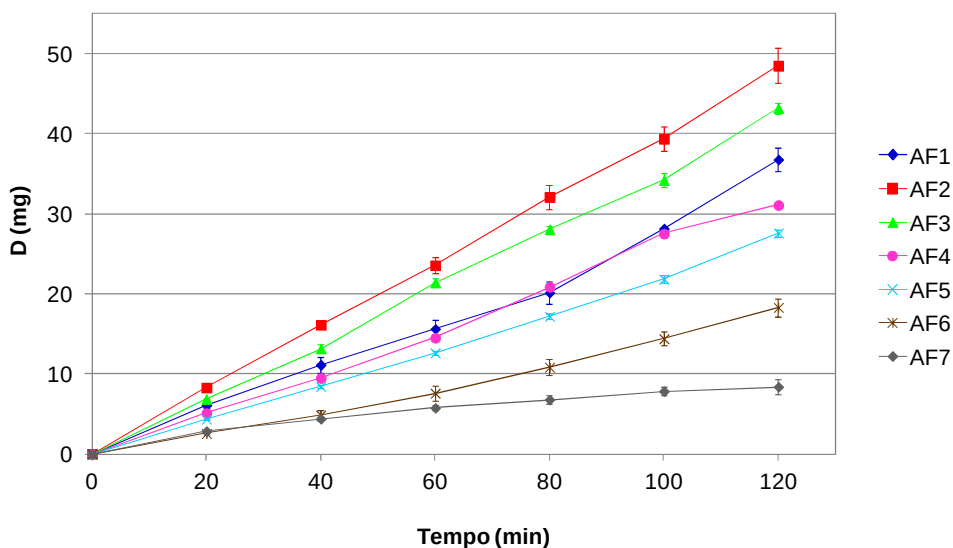


Figura 7.17 – Perda de massa acumulada para o processo MIG/MAG arame frio

A exceção de redução do desgaste com adição de ligas de cobalto na Fig. 7.17, é somente para AF3, com *Stellite 6* no arame frio, que possui uma característica similar a dos

corpos de prova em aço inoxidável austenítico. Isto provavelmente ocorreu porque a liga *Stellite 6* não proporciona uma redução na perda de massa ao longo do ensaio de erosão.

Na Tabela 7.11, comparam-se os valores de taxa de erosão e desgaste para os ensaios, usando somente ligas de cobalto de ambos os processos, ou seja, MIG/MAG arame frio e MIG/MAG duplo arame em série.

Tabela 7.11 – Valores obtidos de perda de massa acumulada (D) e taxa de erosão

Amostra	AF5	AF6	AF7	DS5	DS6
Metal de Adição	6Co+21Co	21Co+6Co	21Co	21Co+6Co	6Co+ 21Co
Dil (%)	18,19	23,07	20,36	13,32	34,75
D (mg)	27,59	18,30	8,38	10,89	19,96
Tx (mg/min)	0,25	0,18	0,05	0,06	0,16

Constata-se, na Tab. 7.16, que nos testes com o processo MIG/MAG duplo arame série, a presença de maior quantidade de *Stellite 21* como no caso de DS5 reduziu o desgaste de forma acentuada. Ao inverter essa combinação com alimentação de maior quantidade de *Stellite 6* (teste DS6), o desgaste torna-se maior. Aparentemente, a diluição não é capaz de alterar significativamente a resistência do depósito, sendo a composição química o fator determinante na obtenção de um revestimento resistente à erosão.

A Figura 7.18 apresenta os resultados para todos os ensaios com ligas de cobalto avaliados em termos de taxa de erosão.

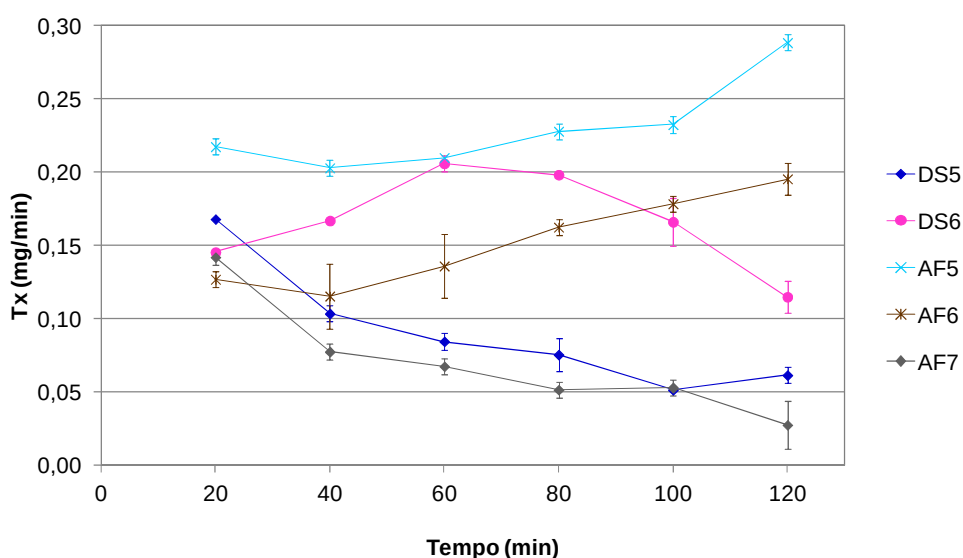


Figura 7.18 – Desempenho com relação à taxa de erosão para as ligas de cobalto

Com relação à taxa de erosão, a amostra AF7 e DS5 dispõe de uma característica similar de desempenho, apesar de uma leve defasagem entre os valores. No ensaio AF5 e AF6, esta evolução novamente é idêntica. A constatação indica que os estágios de desgaste ocorrem de maneira análoga, apesar de certa variação de perda de massa.

A Figura 7.19 apresenta a perda de massa acumulada para os ensaios com ligas de cobalto.

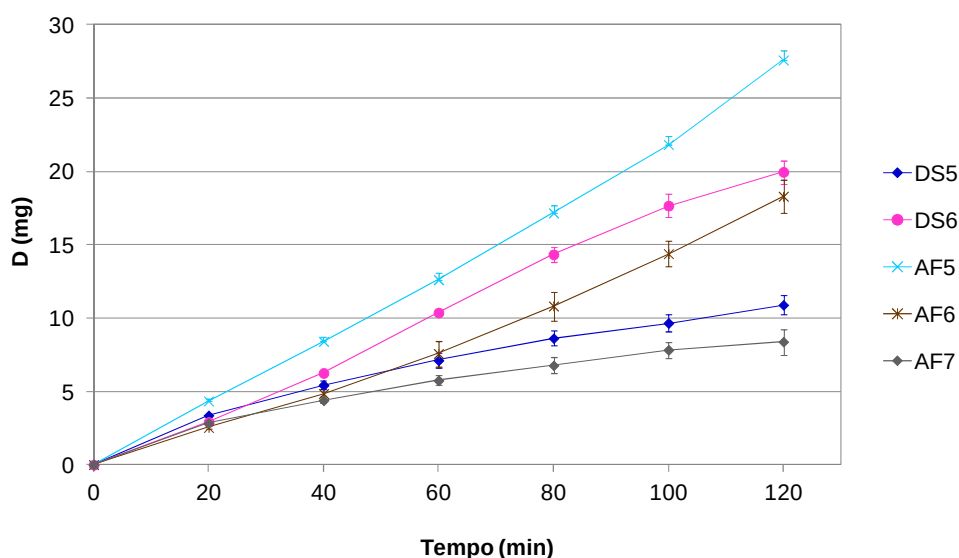


Figura 7.19 – Perda de massa acumulada para os ensaios com liga de cobalto

Novamente, evidencia-se uma característica próxima entre os ensaios DS5 e AF7 relacionadas à presença de quantidades superiores de liga *Stellite 21* no revestimento.

Os resultados de erosão pura realçaram as evidências sobre a presença de mecanismos diferentes, atuando durante o desgaste nos revestimentos soldados com diferentes processos de soldagem e em posições variadas. Este trabalho tem uma contribuição relevante ao proporcionar evidências no sentido de que determinadas combinações de arame eletrodos podem se tornar economicamente viáveis em processos de soldagem como o MIG/MAG arame frio e MIG/MAG duplo arame. Surge um potencial a ser explorado no processo MIG/MAG arame frio que é a utilização do arame não energizado como um fornecedor de elementos de liga e não somente como aumento de produtividade em relação ao MIG/MAG convencional. Essa percepção leva a acreditar na possibilidade de construção de modelos de avaliação de vida e custo, capazes de estimar a melhor solução de compromisso, na tomada de decisão para a escolha entre ligas de cobalto e aços inoxidáveis austeníticos. Esta vertente, voltada para as características econômicas do processo, poderá ser explorada em trabalhos futuros.

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

Os corpos de prova foram avaliados com relação à dureza da seção transversal e camada endurecida após a realização dos ensaios de erosão.

Para o revestimento AF5 formado pela combinação de *Stellite 6* no arame energizado e *Stellite 21* no frio, têm-se a evolução da dureza na seção transversal na Fig. 7.20. Com relação à camada endurecida a Fig. 7.21 apresenta a região de interesse.

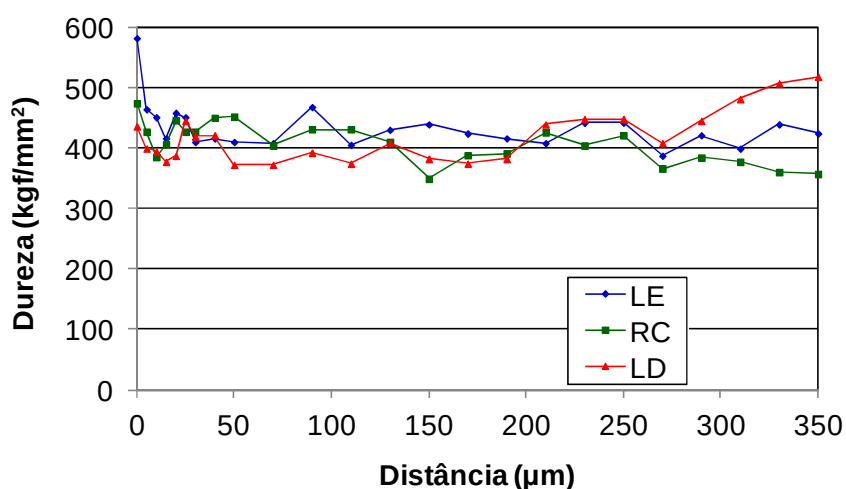


Figura 7.20 – Dureza ao longo da seção transversal do corpo de prova AF5

A Figura 7.21 apresenta regiões de altíssima dureza, em especial no seu lado esquerdo, com valores acima de 600 kgf/mm^2 . Entretanto, existem pontos centrais de baixa dureza com valores em torno de 450 kgf/mm^2 . A reduzida dureza em algumas regiões da amostra é um indicativo da menor resistência, proporcionando uma maior perda de massa, como de fato aconteceu ao avaliar a taxa de erosão em AF5.

Na Tabela 7.12, têm-se os valores limites para a definição da camada endurecida. Constata-se a formação de uma camada endurecida pouco espessa, provavelmente afetada pela grande variabilidade dos valores de dureza no corpo de prova. O aumento na dureza (parâmetro G denominado ganho) foi em torno de 25%.

Tabela 7.12 – Limites de dureza na camada endurecida e substrato para a amostra AF5

Item	LE	RC	LD	M	DP
$H_{\text{LIM}} (\text{kgf/mm}^2)$	476	458	433	456	22
$H_{\text{sub}} (\text{kgf/mm}^2)$	426	408	383	406	22
ECE (μm)	5	5	5	5	0

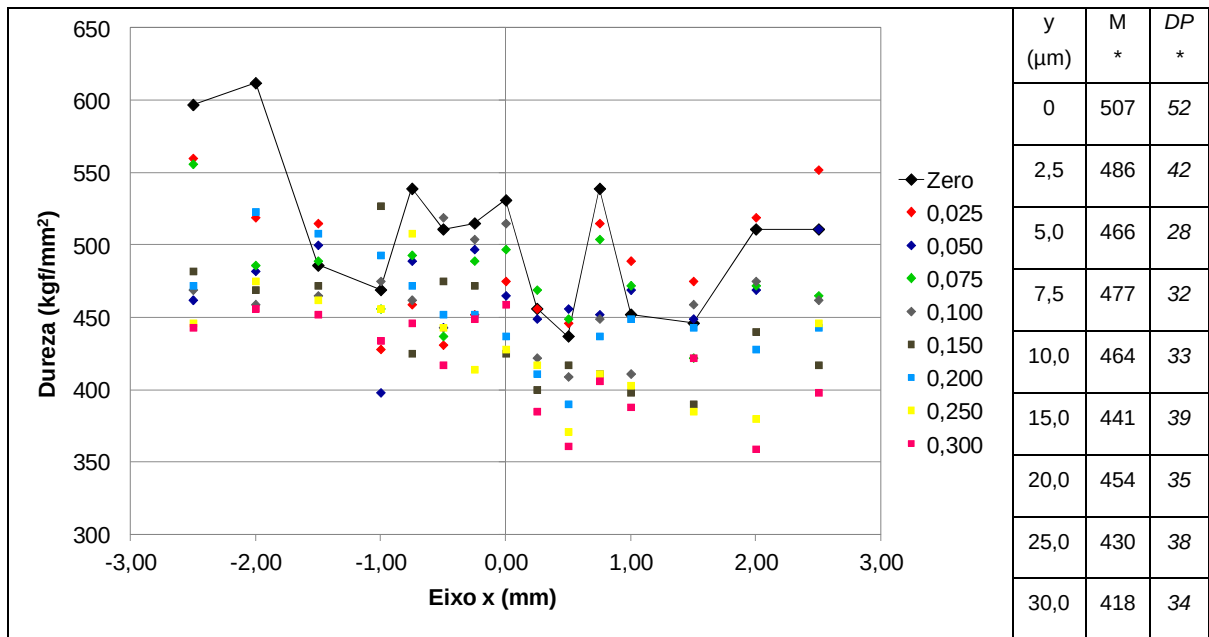


Figura 7.21 – Mapeamento de dureza no corpo de prova AF5. *kgf/mm²

Na Figura 7.22 é apresentada a dureza na seção transversal da amostra AF6 (eletrodo em *Stellite 21* e arame frio em *Stellite 6*). Observam-se regiões com valores acima de 500 kgf/mm² principalmente no lado esquerdo.

A Figura 7.23 apresenta a camada endurecida de AF6 com regiões muito heterogêneas. Existem regiões com dureza acima de 650 kgf/mm², enquanto nos demais pontos estes valores são da ordem de 450 kgf/mm². O menor endurecimento do lado direito da amostra, com grande variabilidade nas demais regiões, pode indicar uma maior susceptibilidade à perda de massa, corroborando os resultados da ordem de 18,30 mg.

Na Tabela 7.13, são apresentados os valores da camada endurecida para a amostra AF6.

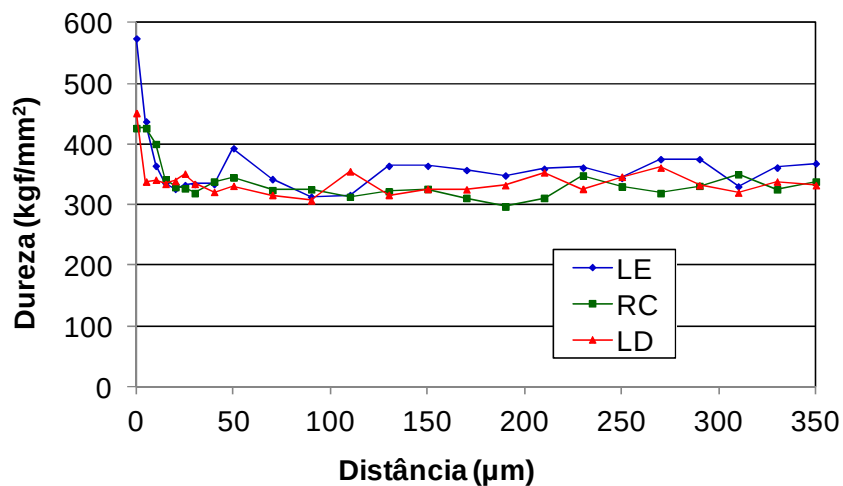


Figura 7.22 – Dureza ao longo da seção transversal do corpo de prova AF6

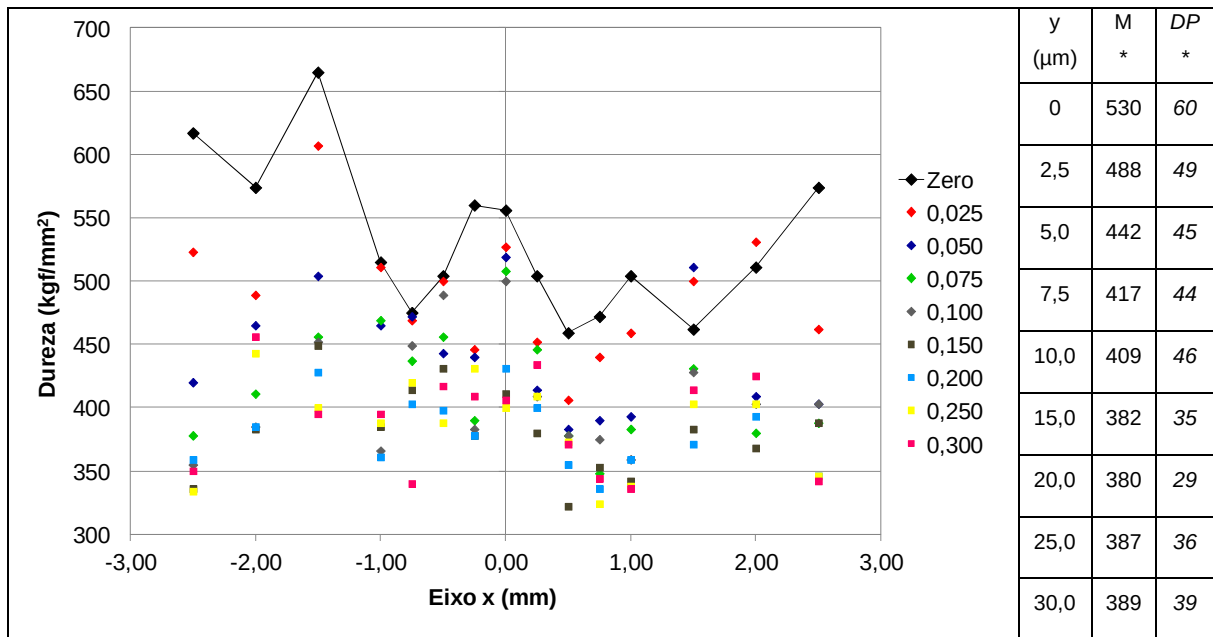


Figura 7.23 – Mapeamento de dureza no corpo de prova AF6. *kgf/mm²

Tabela 7.13 – Limites de dureza na camada endurecida e substrato para a amostra AF6

Item	LE	RC	LD	M	DP
H _{LIM} (kgf/mm ²)	400	370	376	382	16
H _{sub} (kgf/mm ²)	350	320	326	332	16
ECE (μm)	10	15	5	10	5

A camada endurecida de AF6 apresenta espessura média de 10 μm, superior à AF5 com 5 μm. Devido à menor dureza do substrato, o ganho obtido é muito superior, ou seja, o valor de 530 kgf/mm² na superfície é 59% maior do que o substrato com 332 kgf/mm².

A Figura 7.24 apresenta a evolução da dureza ao longo da seção transversal de AF7 soldado com *Stellite 21* com o processo MIG/MAG convencional. Observam-se valores inferiores a 500 kgf/mm² na camada superficial de todas as regiões avaliadas.

Na Figura 7.25, é exibida a camada endurecida, com valores na faixa de aproximadamente 350 até 450 kgf/mm². Vale lembrar que o corpo de prova AF7 apresentou o melhor desempenho com relação à erosão pura. Isto aconteceu provavelmente devido à maior homogeneidade do endurecimento na camada superficial, favorecendo a obtenção de uma maior resistência à erosão.

A espessura da camada endurecida está apresentada na Tab. 7.14, atingindo valores em torno de 18 μm, sendo considerada elevada. Apesar da espessa camada endurecida, o ganho de dureza (G) após a erosão pura é pequeno, de apenas 16%.

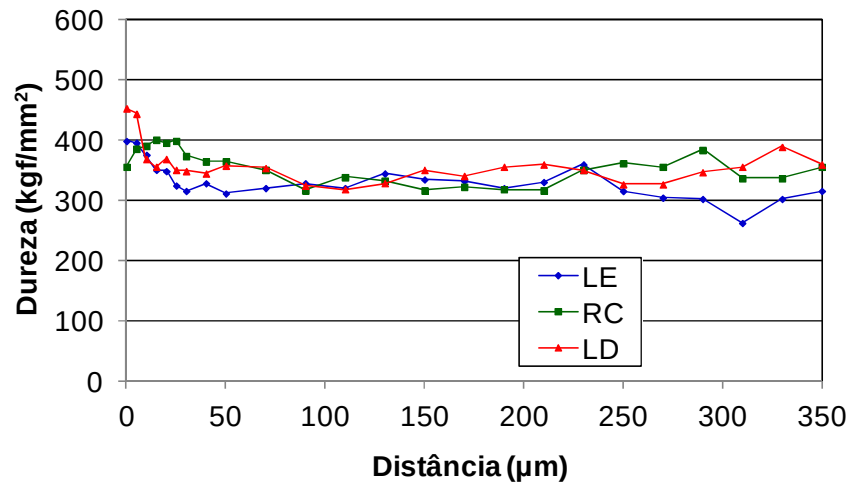


Figura 7.24 – Dureza ao longo da seção transversal do corpo de prova AF7

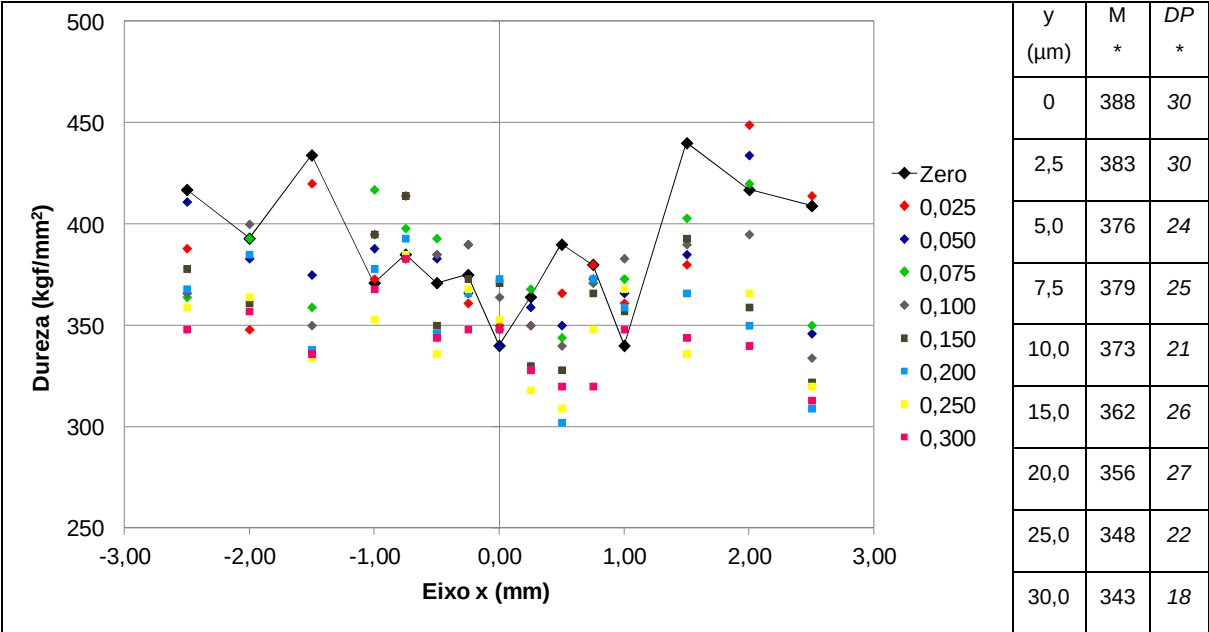


Figura 7.25 – Mapeamento de dureza no corpo de prova AF7. * kgf/mm²

Tabela 7.14 – Limites de dureza na camada endurecida e substrato para a amostra AF7

Item	LE	RC	LD	Média	DP
H _{LIM} (kgf/mm ²)	376	382	391	383	8
H _{sub} (kgf/mm ²)	326	332	341	333	8
ECE (μm)	15	30	10	18	10

Com relação à dureza na seção transversal, o resultado para o corpo de prova DS5 (arame mestre em *Stellite 21* e escravo em *Stellite 6*) é apresentado na Fig. 7.26. A presença do metal de base é notada na amostra em suas laterais, originário do perfil de

penetração do cordão de solda do processo MIG/MAG duplo arame série em forma de cálice.

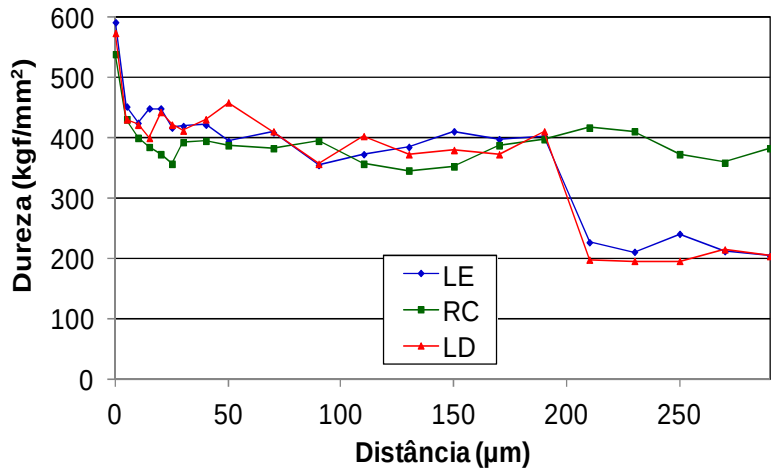


Figura 7.26 – Dureza ao longo da seção transversal do corpo de prova DS4

A camada endurecida na Fig. 7.27 para o ensaio DS5 apresentou um valor elevado de dureza da ordem de 532 kgf/mm². No mapeamento da região endurecida (Fig. 7.27), a dureza tem valores regulares acima de 500 kgf/mm², justificando uma menor taxa de erosão.

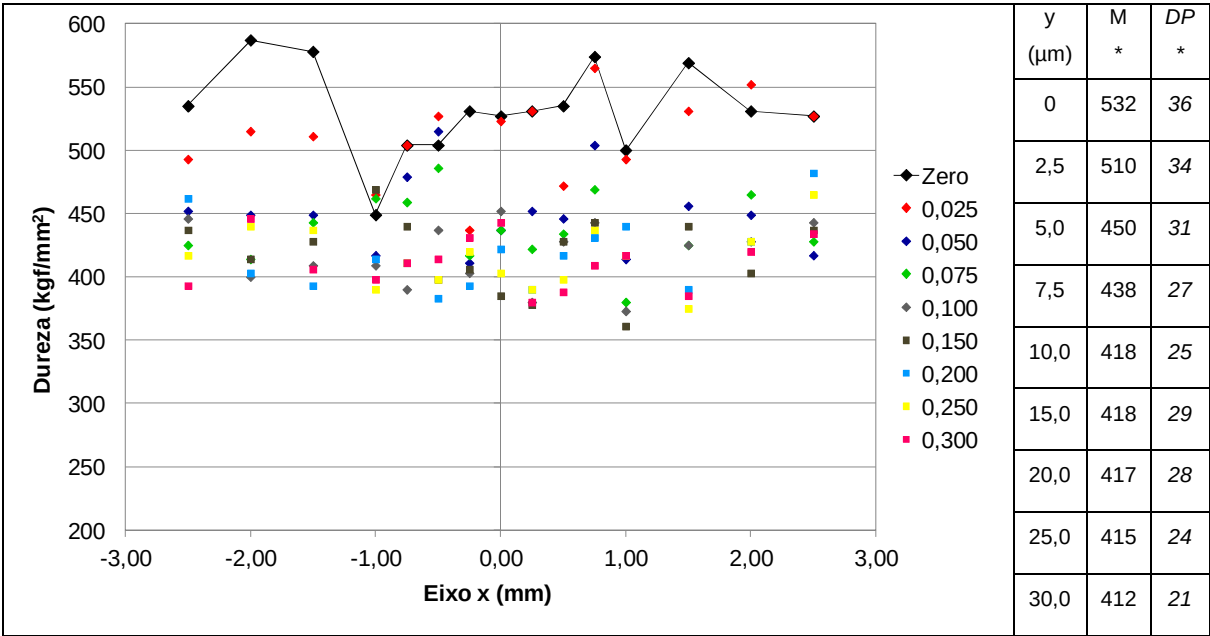


Figura 7.27 – Mapeamento de dureza no corpo de prova DS5. *kgf/mm²

Na Tabela 7.15, é apresentada a espessura da camada endurecida de DS5. 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, com a formação de camada endurecida muito dura e com boa distribuição. O ganho de 37% na dureza reforça o fato, com uma camada endurecida com espessura média de 8 μm .

Tabela 7.15 – Limites de dureza na camada endurecida e substrato para a amostra DS5

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

Para o corpo de prova DS6 (arame mestre em *Stellite 6* e escravo em *Stellite 21*), os valores de dureza na seção transversal analisada são apresentados na Fig. 7.28.

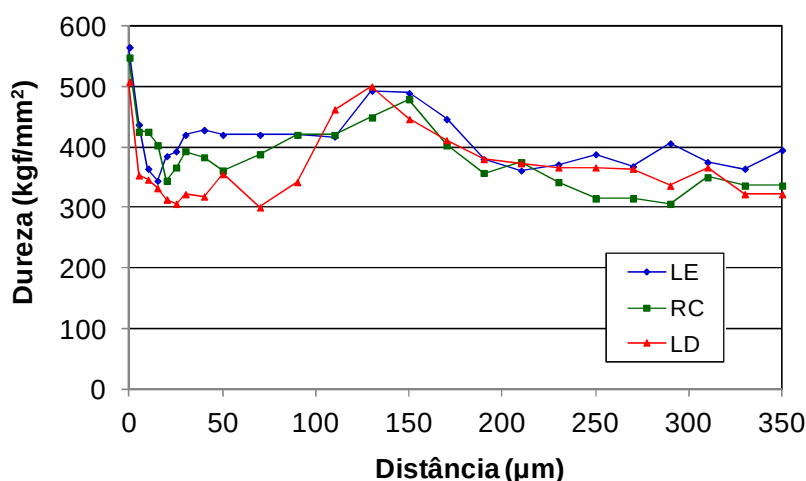


Figura 7.28 – Dureza ao longo da seção transversal do corpo de prova DS6

Na Figura 7.28, ocorreu uma elevação de dureza na região com profundidade entre 100 e 150 μm , com valores em torno de 400 kgf/mm².

A camada endurecida da amostra DS6 está apresentada na Fig. 7.29. Percebe-se claramente que a região central apresenta pontos de dureza muito elevada, acima de 500 kgf/mm² e que as demais áreas não são tão uniformes com valores inferiores.

A Tabela 7.16 traz os valores de espessura da camada endurecida. De acordo com o critério adotado, a camada endurecida possui uma espessura média de 5 μm , sendo sua média de dureza de 570 kgf/mm² e o substrato com 415 kgf/mm², indicando um ganho de 37%.

Com os valores obtidos para a dureza dos corpos de prova soldados somente com ligas de cobalto, propõe-se a Tab. 7.17.

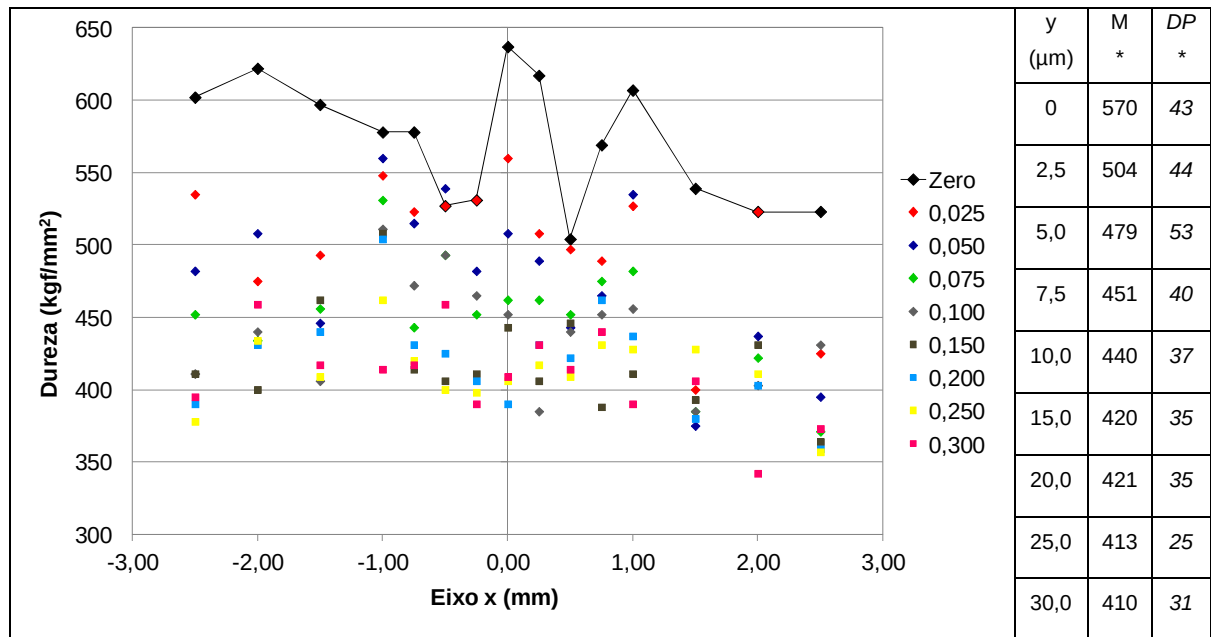


Figura 7.29 – Mapeamento de dureza no corpo de prova DS6. *kgf/mm²

Tabela 7.16 – Limites de dureza na camada endurecida e substrato para a amostra DS6

Item	LE	RC	LD	Média	DP
H _{LIM} (kgf/mm ²)	486	460	450	465	19
H _{sub} (kgf/mm ²)	436	410	400	415	19
ECE (μm)	5	5	5	5	0

Tabela 7.17 – Valores de dureza superficial, com o respectivo ganho, taxa de erosão e desgaste

CS	H _{sup} (kgf/mm ²)	H _{sub} (kgf/mm ²)	G (%)	Tx (mg/min)	D (mg)
AF5	507	406	24,87	0,25	27,59
AF6	530	332	59,63	0,18	18,30
AF7	388	333	16,51	0,05	8,38
DS5	532	388	37,11	0,06	10,89
DS6	570	415	37,35	0,16	19,96

Ao analisar a Fig. 7.30 com relação à dureza da camada endurecida e substrato, não percebe-se uma tendência clara dos resultados. Um indício é de que os depósitos apresentam durezas análogas para o mesmo processo de soldagem independente da combinação de ligas.

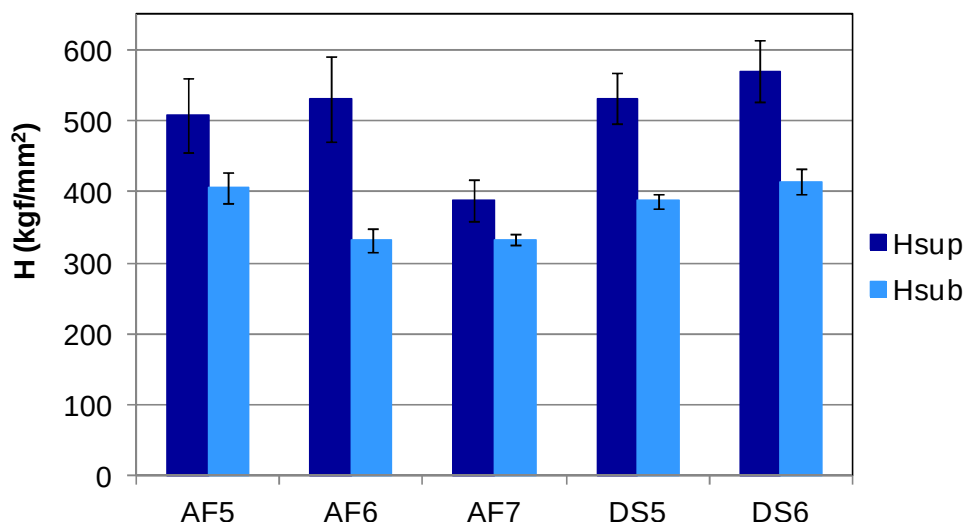


Figura 7.30 – Dureza das amostras submetidas à erosão

Nesse sentido, o corpo de prova AF7 em MIG/MAG convencional apresenta os menores valores de dureza observados para as combinações em ligas de cobalto, apesar da menor perda de massa na erosão pura. A amostra DS6 com a presença principalmente da liga *Stellite 6* apresentou altos valores de dureza, porém elevada taxa de erosão.

Com relação ao ganho de dureza (G), a Fig. 7.31 traz os resultados obtidos para as ligas de cobalto. Em termos gerais, os pontos extremos de taxa de erosão (maior em AF5 e menor em AF7) apresentaram os menores ganhos de dureza. Nota-se, portanto, que os corpos de prova com menores ganhos de dureza (G) para o processo MIG/MAG arame frio possuem as menores taxas de erosão. No processo MIG/MAG duplo arame série tal fato não é observado. Esta observação, entretanto, não é totalmente aplicável para as ligas de cobalto e os resultados obtidos para as combinações propostas na tese estão de acordo com as análises feitas por Nsoesie et al. (2014) ao estudarem ligas *Stellites*.

Nsoesie et al. (2014) observaram que, em geral, a dureza das ligas de cobalto aumenta com a elevação no conteúdo de carbonetos. Nota-se, em geral, que a resistência ao desgaste das ligas *Stellites* amplia com o crescimento da dureza, porém, o tipo e quantidade de carbonetos e a distribuição dos compostos intermetálicos também influenciam de forma significativa a taxa de erosão. Para a erosão em incidência normal, uma elevação excessiva na dureza pode influenciar na fragilidade do material fazendo com que ocorra uma maior perda de massa, como observado em ligas de cobalto com elevados teores de carbono, cromo e tungstênio (NSOESIE et al. 2014). Provavelmente este fato tenha sido o principal fator de influência para uma perda de massa elevada em AF5, DS5 e DS6, tendo em vista o alcance de uma dureza muito elevada na camada endurecida acima

de 500 kgf/mm². Além disso, é notável uma espessa camada endurecida obtida em AF7 em torno de 18 µm.

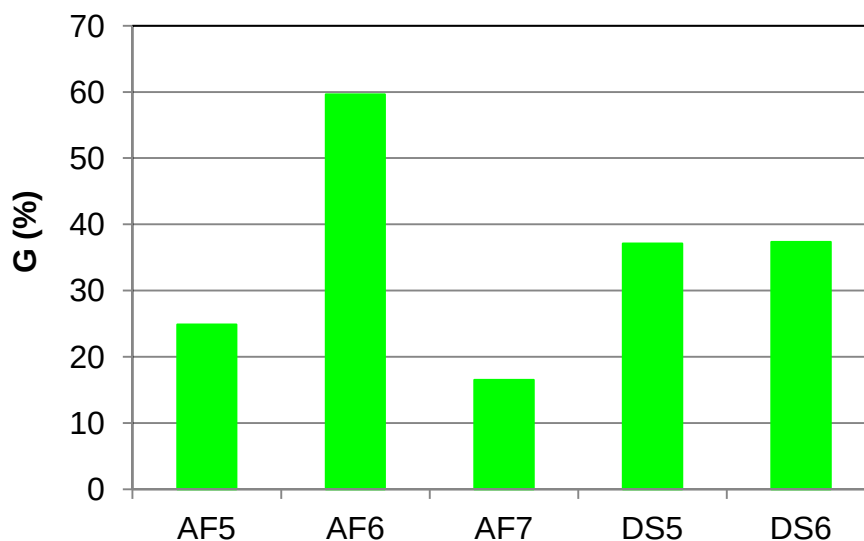


Figura 7.31 – Ganho de dureza durante a erosão

7.4. Análise das características topográficas das amostras de erosão

Nas amostras soldadas com ligas de cobalto, o processo erosivo foi estudado através da avaliação quantitativa da topografia. Caracterizou-se a morfologia da superfície após os ensaios, procurando entender os efeitos do desgaste através da medição de parâmetros topográficos. Inicialmente foi avaliada a amostra em MIG/MAG arame frio e, em seguida, MIG/MAG duplo arame série.

Para a amostra AF5, os resultados são apresentados na Fig. 7.32. A Figura 7.33 apresenta o perfil de rugosidade na região central de medição para a direção leste-oeste e norte-sul, de acordo com o procedimento da Fig. 3.22 do Capítulo III.

A Tabela 7.18 apresenta os parâmetros de rugosidade para a amostra AF5 (composta de *Stellite 6* e 21) após o ensaio de erosão pura, de acordo com as diversas formas de análise empregadas.

Tabela 7.18 – Valores de rugosidade para amostra AF5 erodida, parâmetros em µm

Local	Sa	Sq	St	Ssk	Sku	Figura
A _{Erod}	1,500	1,960	30,900	-0,540	5,080	7.32

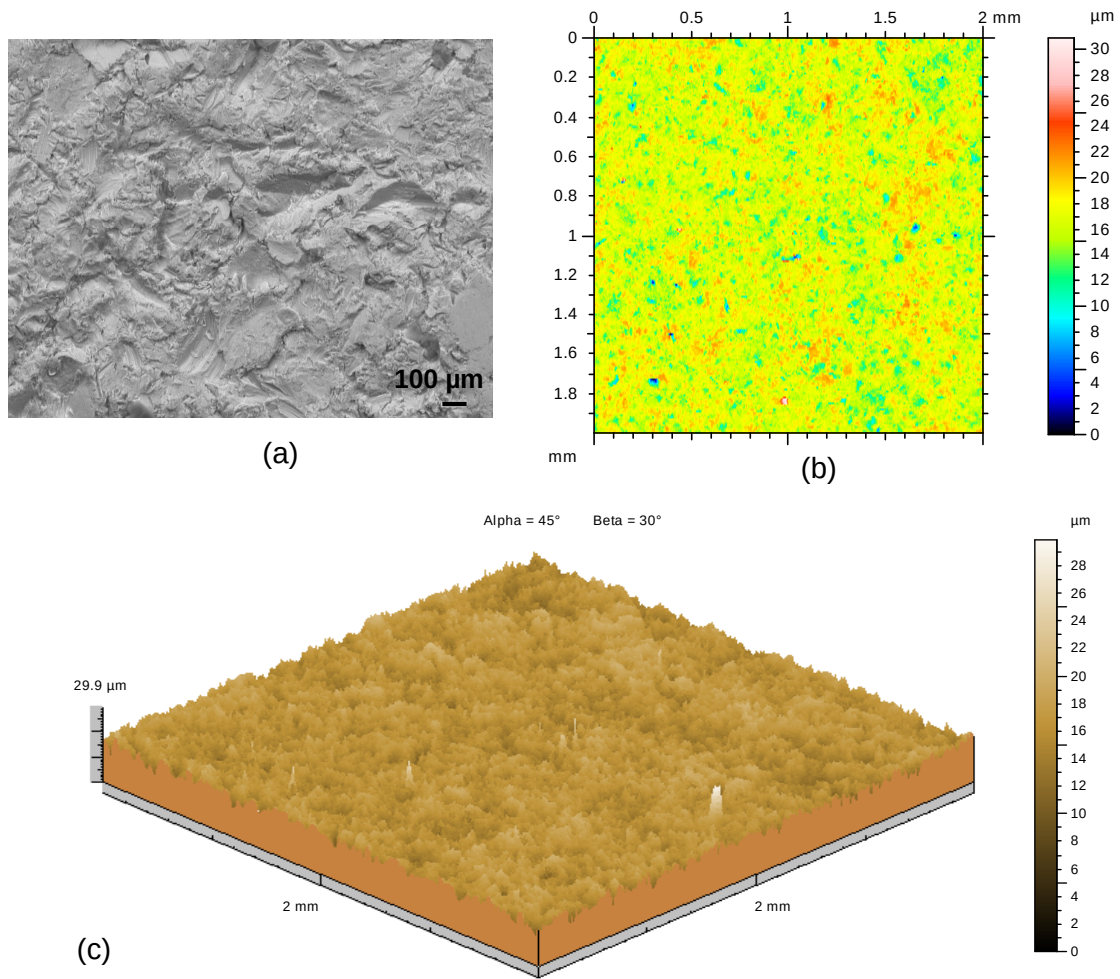


Figura 7.32 – Topografia AF5, (a) MEV, (b) diagrama de nível (c) topografia tridimensional

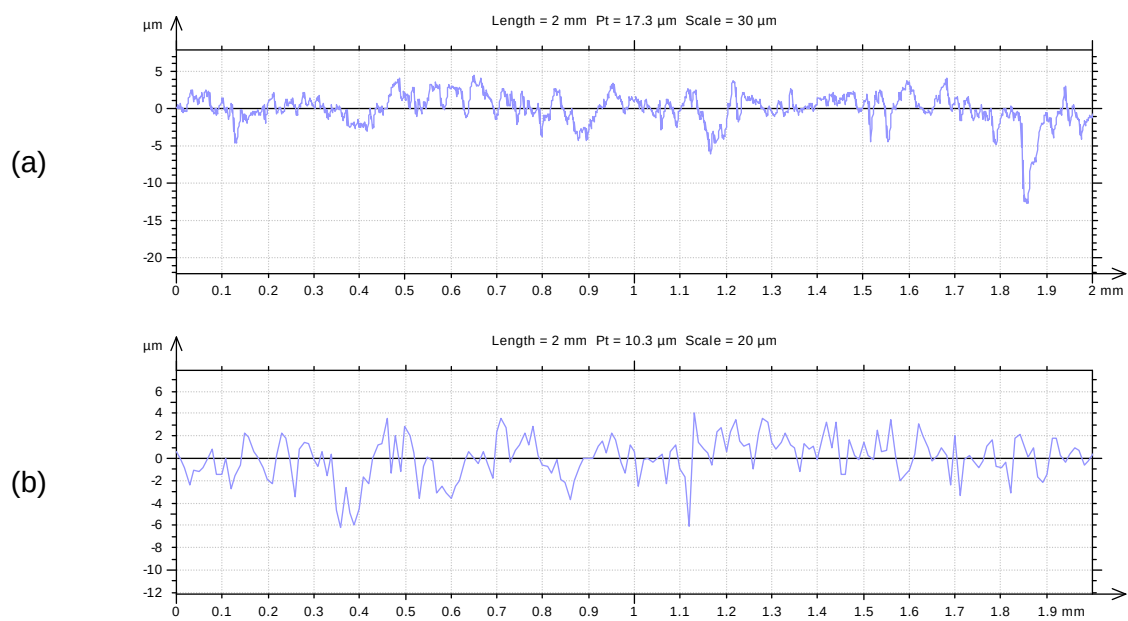


Figura 7.33 – Perfil de rugosidade, (a) leste oeste e (b) norte sul

Na Tabela 7.18, o parâmetro *S* indica a avaliação da área. São avaliados o desvio médio aritmético (*Sa*), o desvio médio quadrático (*Sq*), a altura total do perfil (*St*), o fator de assimetria (*Ssk*) e o fator de achatamento (*Sku*). De acordo com a Tab. 7.18, a amostra AF5 possui baixo valor de *Sa*, considerando os demais ensaios em MIG/MAG arame frio.

O valor elevado de *St* é atribuído ao número elevado de picos e vales de grande amplitude e baixa densidade. Sua assimetria é negativa, ou seja, as amplitudes de maior frequência têm valores maiores que a média (perfil platô). Observa-se ainda uma centralização da distribuição, devido ao valor de *Sku* > 3.

O aspecto topográfico da amostra AF6 (composta de *Stellite 21* e 6) é apresentado na Fig. 7.34. Na Figura 7.34 (b), os picos e os vales de forma geral, estão bem distribuídos na amostra, com presença de pontos acentuados e isolados.

A Figura 7.35 apresenta o perfil de rugosidade na região central de medição para a direção leste-oeste e norte-sul da amostra AF6 e a Tab. 7.19 traz os parâmetros de rugosidade, de acordo com os resultados obtidos.

Analisando a Tab. 7.24, AF6 tem um valor de *Sa* superior à AF5, com picos e vales pronunciados (elevado *St*), uma assimetria negativa e um perfil de distribuição normal. A avaliação da superfície erodida nas Figs. 7.34 e 7.35 corroboram esta evidência, com a presença de picos e vales isolados.

Tabela 7.19 – Valores de rugosidade para amostra AF6 erodida, parâmetros em μm

Local	<i>Sa</i>	<i>Sq</i>	<i>St</i>	<i>Ssk</i>	<i>Sku</i>	Figura
<i>A_{Erod}</i>	1,850	2,410	42,200	-0,581	4,940	7.34

Para o teste AF7 obtido através de MIG/MAG convencional com eletrodo em *Stellite 21*, a caracterização topográfica está na Fig. 7.36. Nota-se, na Fig. 7.36 (b), em seu diagrama de nível que a amostra tem pontos de picos e vales pronunciados bem distribuídos. Na Fig. 7.36 (c), os pontos de picos pronunciados com baixa densidade de material são nítidos.

A Figura 7.37 apresenta o perfil de rugosidade na região central de medição para a direção leste-oeste e norte-sul da amostra AF7. A Tabela 7.20 apresenta os parâmetros de rugosidade para a amostra AF7 em todas as regiões estudadas.

Tabela 7.20 – Valores de rugosidade para amostra AF7 erodida, parâmetros em μm

Local	<i>Sa</i>	<i>Sq</i>	<i>St</i>	<i>Ssk</i>	<i>Sku</i>	Figura
<i>A_{Erod}</i>	1,720	2,230	30,600	-0,659	4,450	7.36

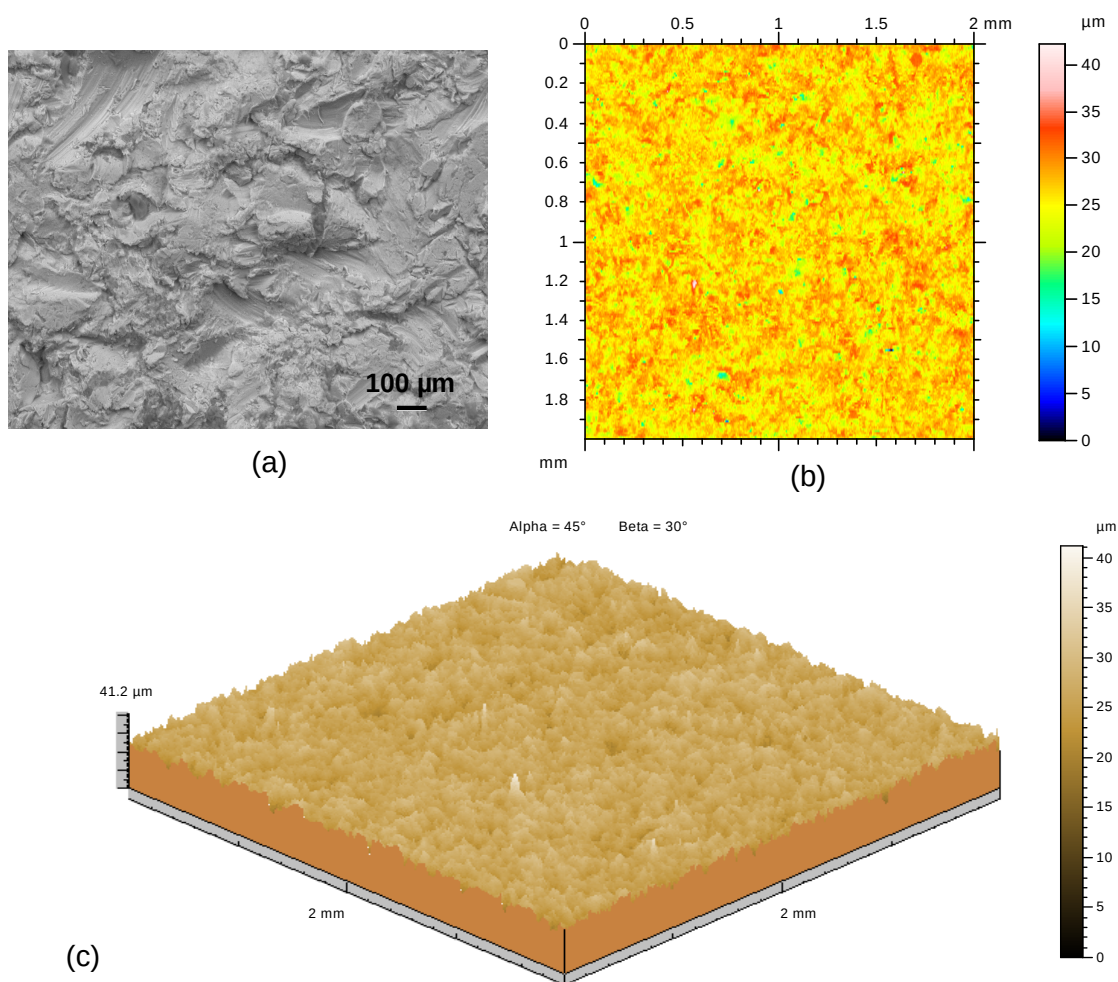


Figura 7.34 – Topografia AF6, (a) MEV, (b) diagrama de nível (c) topografia tridimensional

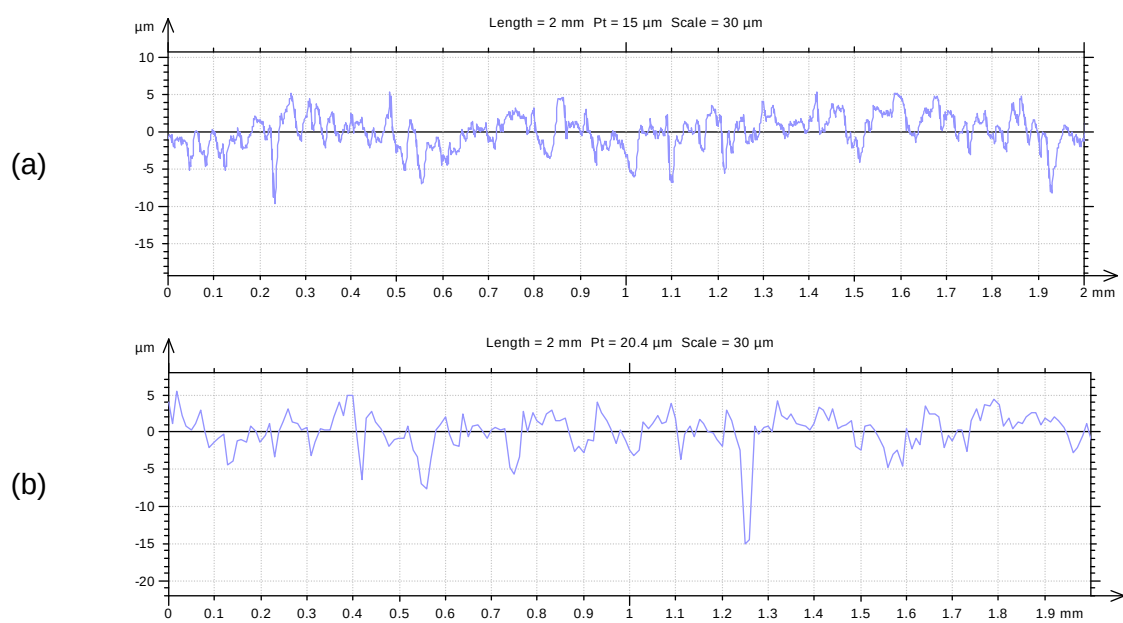


Figura 7.35 – Perfil de rugosidade, (a) leste oeste e (b) norte sul para a amostra AF6