
Copyright 2018, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2018, em São Paulo, no mês de maio de 2018.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Avaliação do desempenho de dois tipos de revestimentos antiaderentes e dois pré-tratamentos em substratos de alumínio

Matéria
Táise Andreoli^a, Eliena Jonko Birriel^b

Abstract

Polytetrafluoroethylene is a nonstick organic coating based on fluoropolymers used in domestic utensils. In this study, two nonstick coatings consisting of three layers, primer, mid coat and top coat, and two surface treatments (a combination of chemical and mechanical or chemical only treatment) were prepared on 4006 aluminum alloy substrates. The samples were separated into 4 groups, varying the treatment type and the coating (type X or Y). In the QMX samples, the surface was prepared with the combination of chemical and mechanical treatment and the X type coating. The QMY samples were treated by the chemical and mechanical combination and Y type coating. The surface of the QX samples was prepared with chemical treatment and the X type coating. In the QY samples, the surface was prepared with chemical treatment and the Y type coating. A hundred samples were produced, 25 in each combination, which were used to perform the roughness, thickness (SBAR and LGA), sessile drop, adhesion, durability of the nonstick and 24h corrosion (NaCl), in order to evidence the best combination of treatment and coating. Analyzing the results, among the four combinations tested, the QY samples, with chemical treatment and nonstick Y presented better performance.

Key words: aluminum, surface preparation. nonstick coating, corrosion.

Resumo

O PTFE (politetrafluoroetileno) é um revestimento orgânico antiaderente a base de fluoropolímeros utilizado em utensílios domésticos. Neste estudo, avaliaram-se dois revestimentos antiaderentes formados por três camadas, primer, mid coat e top coat, e dois pré-tratamentos superficiais (uma combinação entre tratamento químico e mecânico ou somente químico), em substratos da liga de alumínio 4006. As amostras foram separadas em 4 grupos, com variação do tipo de pré-tratamento e pelo revestimento (tipo X ou Y). Nas amostras QMX, a superfície foi preparada com a combinação de tratamento químico e mecânico e o revestimento tipo X. As amostras QMY receberam pré-tratamento através da combinação químico e mecânico e revestimento tipo Y. A superfície das amostras QX foi preparada com tratamento químico e o revestimento tipo X. Nas amostras QY, a superfície foi preparada com tratamento químico e o revestimento tipo Y. Foram produzidas 100 amostras,

^a Engenheira Química – Tramontina S. A. Cutelaria

^b Dr^a. Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – LCOR, 95070-560, UCS Caxias do Sul, RS

25 em cada combinação, as quais foram utilizadas para a realização dos ensaios de rugosidade, espessura de camada, abrasão (SBAR e LGA), gota séssil, aderência, durabilidade da antiaderência e corrosão 24h com NaCl em ebulição, a fim de evidenciar a melhor combinação de tratamento e revestimento. Analisando os resultados, dentre as quatro combinações ensaiadas, as amostras QY, com tratamento químico e revestimento antiaderente Y apresentaram melhor desempenho.

Palavras chave: alumínio, preparação de superfície, revestimento antiaderente, corrosão.

Introdução

Dois principais materiais são utilizados para a produção de utensílios de cozinha, utilizados como amostras nesse estudo. Um material é metal, o qual fornece a estrutura do utensílio. O outro material é um revestimento antiaderente, formado por três camadas, a base de fluoropolímeros, como o politetrafluoroetileno (PTFE), o etileno-propileno fluorado (FEP), perfluoroalcoxi (PFA) e a poliamida-imida (PAI). Esses fluoropolímeros conferem as propriedades do revestimento, como aderência, antiaderência, resistência à abrasão e resistência química.

O processo de produção dos utensílios de cozinha com revestimento antiaderente compreende basicamente na laminação das bobinas de alumínio até a espessura desejada, corte de discos para posterior estampagem, preparação da superfície metálica e aplicação do revestimento antiaderente.

A preparação da superfície pode acontecer de diversas formas, elas são classificadas como mecânicas ou químicas. O estudo visa relacionar duas formas de pré-tratamentos, uma realizada através da combinação entre o tratamento químico e mecânico e a outra realizada somente pela ação química. Com posterior aplicação do revestimento antiaderente, com secagem entre as camadas, *primer*, *mid coat* e *top coat*, de dois fornecedores diferentes.

O estudo foi desenvolvido com amostras combinando a variação dos dois tipos de tratamento superficial e dos dois fornecedores de revestimentos, formando quatro combinações diferentes, a fim de relacionar a melhor opção. Para isso ensaios de desempenho químico, físico e mecânico, como resistência a abrasão, adesão ao substrato, antiaderência, gota séssil e corrosão, são realizados no revestimento.

Metodologia

As amostras foram produzidas com a liga de alumínio 4006 especialmente para a utilização nos ensaios, com aplicação do revestimento antiaderente apenas no lado interno da peça, conforme Figura 1. O revestimento antiaderente é composto por três camadas: *primer*, *mid coat* e *top coat*. Os dois revestimentos aplicados são de diferentes fornecedores, os quais são produzidos a base de fluoropolímeros e, por questão de ética optou-se por nomeá-los de fornecedor X e Y.



Figura 1 – Utensílio utilizado como amostra.

As amostras utilizadas nos ensaios foram separadas em quatro grupos, as quais foram classificadas quanto ao pré-tratamento da superfície do alumínio, e do revestimento orgânico, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Descrição das amostras de utensílios de cozinha.

Amostras	Pré-tratamento realizado	Fornecedor do revestimento antiaderente
QMX	Químico e Mecânico	X
QMY	Químico e Mecânico	Y
QX	Químico	X
QY	Químico	Y

Foram produzidas 100 amostras. Em 50 delas, o pré-tratamento superficial foi realizado através de uma combinação entre tratamento químico e mecânico e em outras 50 amostras o tratamento utilizado foi por ação somente química. Dessas 50 amostras com preparação combinada entre químico e mecânico, 25 delas receberam o revestimento tipo X e as outras 25 receberam revestimento tipo Y. E, as 50 amostras com pré-tratamento somente pela ação química foram divididas da mesma maneira, quanto ao revestimento.

O processo de produção das amostras tem início no setor de corte de discos, onde a bobina de alumínio foi cortada, em prensas hidráulicas, no tamanho específico de diâmetro igual a 315 mm e espessura de 3 mm e, em seguida, as amostras foram estampadas formando o utensílio desejado.

Conforme a variação das características apresentadas na Tabela 1, as amostras QX e QY foram submetidas ao pré-tratamento químico, em máquina de lavar, que acontece em cinco etapas. No primeiro estágio foi utilizada água quente, a temperatura de $60^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$. No segundo estágio, utilizou-se uma solução com desengraxante alcalino com concentração de 4,8% em água a temperatura de $60^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$. Os dois estágios seguintes compreenderam o enxague com água a temperatura ambiente. E, no último estágio os utensílios foram lavados com água desmineralizada.

As amostras QMX e QMY foram submetidas ao pré-tratamento combinado entre químico e mecânico, que aconteceu em três etapas: limpeza em máquina de lavar, jateamento e, novamente limpeza na máquina de lavar. A primeira etapa da limpeza iniciou com a lavagem das peças com água a temperatura de $60^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$. No segundo estágio, foi utilizada uma solução com desengraxante alcalino com concentração de 4,8% em água a temperatura

de $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$. O próximo estágio compreendeu a etapa de enxague com água a temperatura ambiente. E, após, passaram pelo processo de secagem. Depois disso, as peças foram jateadas com óxido de alumínio grão 60. Após o jateamento, novamente foi realizada a limpeza na máquina de lavar. Em que, no primeiro estágio as peças foram lavadas com água a temperatura de $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$. No segundo estágio, foi utilizada uma solução com desengraxante alcalino com concentração de 3 % em água a temperatura de $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Os dois estágios seguintes compreenderam o enxague com água a temperatura ambiente. E, no último estágio os utensílios foram lavados com água desmineralizada.

O princípio de funcionamento do jateamento consiste na projeção de material abrasivo contra a superfície a ser limpa por ar pressurizado. Isto provoca um aumento da rugosidade e consequente aumento da área de contato (1).

Após a preparação da superfície, o revestimento antiaderente foi aplicado. A base dos dois revestimentos (X e Y) é o politetrafluoroetileno (PTFE), que consiste em três camadas, em células de aplicação distintas, para formar o revestimento antiaderente. A Tabela 2 apresenta as três camadas do revestimento e seus principais componentes.

Tabela 2 – Principais componentes das três camadas do revestimento antiaderente.

Camada do revestimento	Principais componentes
<i>Primer</i>	politetrafluoroetileno e poliamida-imida
<i>Mid Coat</i>	politetrafluoroetileno, etileno-propileno fluorado e pigmentos
<i>Top Coat</i>	politetrafluoroetileno, etileno-propileno fluorado, perfluoroalcoxi e pigmentos de efeito

Entre a aplicação das camadas ocorreu a secagem em aproximadamente $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ e a cura final aconteceu após a aplicação da terceira camada em aproximadamente quinze minutos, onde o utensílio permaneceu a $430\text{ }^{\circ}\text{C}$ por três minutos, em um forno com queimadores de gás natural.

A composição química da liga de alumínio utilizada para a fabricação das amostras foi avaliada em espectrômetro de emissão ótica, modelo SPECTROMAXx, da AMETEK. Os ensaios foram realizados em triplicata, portanto, as amostras divididas nos quatro principais grupos de amostragem recebem designação para cada ensaio conforme especificado na Tabela 3.

Tabela 3 – Representação da nomenclatura das amostras utilizadas nos ensaios de desempenho do revestimento em utensílios de cozinha.

continua

Amostras	Tratamento	Revestimento	Designação
QMX	químico + mecânico	X	QMX A
			QMX B
			QMX C
conclusão			
QMY	químico + mecânico	Y	QMY A
			QMY B
			QMY C

QX	químico	X	QX A
			QX B
			QX C
QY	químico	Y	QY A
			QY B
			QY C

A análise da rugosidade foi realizada nas peças após os processos da preparação da superfície e o parâmetro de medição considerado foi o Ra, o qual representa a rugosidade média aritmética dos valores absolutos. Para isso foi utilizado um rugosímetro Mitutoyo SJ-310.

A espessura da camada do revestimento segue um procedimento interno da empresa metalúrgica, o qual descreve que devem ser realizadas dezesseis medidas na parte plana do utensílio, com isso obtêm-se o valor médio da espessura de camada. O equipamento utilizado para as medidas foi um Iscope FMP10 da Fischer com sonda também da Fischer modelo FTA 3.3-5.6.

No Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) foram avaliadas as seções transversais para a determinação da espessura das camadas que formam o revestimento antiaderente e para análise EDS, a fim de identificar as características de cada revestimento (X e Y).

O ensaio de resistência à abrasão SBAR tem o objetivo de determinar a resistência do utensílio simulando a lavagem na utilização normal. Para verificar essa resistência, o ensaio segue o procedimento descrito na norma ABNT NBR 15321 (2) em um equipamento específico. O dispositivo é composto por uma plataforma fixa onde o utensílio é posicionado, uma haste e um painel elétrico. A haste realiza movimentos horizontais de vai e vem e é composta por uma base que exerce uma pressão constante. Uma esponja abrasiva do tipo Scotch-brite é posicionada entre a base da haste e o utensílio, ou seja, sobre o revestimento do utensílio. O fundo do utensílio foi preenchido com uma solução aquosa de 5 g/L de detergente neutro e a esponja posicionada na base da haste foi substituída a cada 250 ciclos, até completar o total de 30.000 ciclos em cada amostra. A área do ensaio foi fotografada e o resultado foi avaliado utilizando o *software ImageJ*, com o recurso *Threshold*.

O ensaio de abrasão LGA segue um procedimento interno da empresa metalúrgica. Inicialmente foi realizada a medida do diâmetro do fundo do utensílio e a área foi dividida em 4 quadrantes e, com auxílio da fita adesiva 3M Silver Tape, foram cobertos três quadrantes separadamente. O utensílio foi preenchido com uma mistura abrasiva de esferas de aço inoxidável de Ø 4 mm, óxido de alumínio grão 20 e água. A peça foi posicionada sobre uma plataforma universal AS 501.1 composta por um agitador orbital modelo KS 501 digital, marca IKA. O agitador foi acionado na velocidade de 300 rpm (± 5 rpm) e a cada 15 minutos a fita de um dos quadrantes foi retirada. Ao final do ensaio, a amostra apresentou um quadrante sem abrasão, um com 15 minutos, um com 30 minutos e um com 45 minutos de abrasão.

A avaliação foi realizada em cada quadrante e atribuída uma nota parcial, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Avaliação da nota parcial para cada quadrante no ensaio de abrasão LGA

Grau de abrasão	Nota
-----------------	------

Sem alteração visível	1,0
Leve perda de brilho	1,5
Perda de brilho. Leve rugosidade superficial	2,0
Acentuada perda de brilho. Leve rugosidade superficial e abrasão seletiva	2,5
Acentuada rugosidade superficial. Abrasão seletiva	3,0
Acentuada abrasão seletiva. Metal parcialmente visível	3,5
Revestimento severamente danificado. Metal muito visível	4,0
Revestimento quase completamente removido	4,5
Revestimento completamente removido	5,0

A partir do somatório do resultado total obtido o utensílio é classificado conforme a Tabela 5 quanto à resistência à abrasão LGA.

Tabela 5 – Classificação qualitativa do revestimento conforme nota obtida no ensaio de abrasão LGA.

Nota	Conceito
1,00 – 1,99	Excelente
2,00 – 2,99	Bom
2,50 – 2,99	Ainda bom
3,00 – 3,49	Aceitável
3,50 – 3,99	Ainda aceitável
4,00 – 4,49	Inaceitável
4,50 – 5,00	Absolutamente inaceitável

O ensaio de gota séssil foi realizado a fim de analisar o ângulo de contato em revestimento e após o utensílio ser submetido ao ensaio de abrasão LGA. Para a preparação das amostras, foram utilizados os mesmos utensílios do ensaio de abrasão LGA. Esses utensílios foram divididos em quatro quadrantes, conforme o tempo de abrasão (0, 15, 30 e 45 minutos, para depois realizar o ensaio de gota séssil e medir o ângulo de contato entre a superfície e a gota de água, relacionando com o tempo de abrasão. A leitura do ângulo entre a superfície plana com revestimento e a gota de água foi realizado através do *software ImageJ* com o recurso *DropSnake*.

O ensaio da durabilidade da antiaderência tem o objetivo de verificar o desempenho do revestimento interno do utensílio quanto à resistência a antiaderência relacionado com o desgaste proporcionado pela abrasão LGA. O ensaio é realizado intercalando um ciclo de antiaderência com leite e um de abrasão LGA conforme projeto ABNT NBR 15321, ABR 2017 [3].

A cada ciclo de antiaderência o resultado é avaliado conforme Tabela 6.

Tabela 6 – Classificação do resultado da antiaderência com leite. Adaptado de ABNT 15321 (3).

Remoção do filme de leite carbonizado do utensílio	Classificação
--	---------------

O filme de leite solta-se totalmente sob a ação do jato de água	5
Após imersão em 20 mm de água, o filme de leite solta-se totalmente sob a ação do jato de água pelo tempo de 2 min	3
O filme solta-se facilmente friccionando-se uma esponja macia, com até 10 passadas em movimentos circulares sobre a área do filme aderido no utensílio	1
O filme não é removido totalmente friccionando-se uma esponja macia	0

O ensaio termina quando a pontuação da antiaderência for igual a zero ou quando completar dez ciclos de abrasão LGA e onze ciclos de antiaderência. O resultado do ensaio é a pontuação do somatório dos ciclos de antiaderência com leite, podendo atingir até 55 pontos, divididos nas categorias abaixo (3):

- Classe A – excelente, onde $\sum \geq 50$;
- Classe B – muito boa, onde $31 \leq \sum < 50$;
- Classe C – boa, onde $19 \leq \sum < 31$;
- Classe D – média, onde $13 \leq \sum < 19$;
- Classe E – baixa, onde $4 \leq \sum < 13$;
- Classe F – nenhuma, onde $\sum < 4$.

O ensaio de corrosão com NaCl foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR 15321 (2). O utensílio foi preenchido com uma solução aquosa de NaCl em concentração de 10 % até completar 2/3 da capacidade volumétrica total e permaneceu sob ebulição por 24 horas. A classificação do resultado leva em consideração os parâmetros estipulados na ABNT NBR 15321 (2), a qual leva em consideração a quantidade de defeitos relacionados a corrosão pela área do utensílio.

Resultados

A liga de alumínio utilizada para a fabricação das amostras possui composição química descrita na Tabela 7.

Tabela 7 – Composição química (%) obtida em espectrômetro das amostras da liga de alumínio 4006.

	Si	Fe	Mn	Mg	Cu	Zn	Ti	B	Al
AM 1	0,8040	0,6010	0,0103	0,0002	0,0024	0,0010	0,0326	0,0011	98,5474
AM 2	0,8070	0,5820	0,0093	0,0002	0,0022	0,0010	0,0375	0,0026	98,5582
AM 3	0,7820	0,5800	0,0099	0,0005	0,0025	0,0010	0,0338	0,0010	98,5893
Média	0,7977	0,5877	0,0098	0,0003	0,0024	0,0010	0,0346	0,0016	98,5650

Os resultados obtidos estão de acordo com o limite de composição química apresentados pela ABAL (Associação Brasileira do Alumínio) (4).

Na análise da rugosidade, foram obtidos os valores especificados na tabela 8.

Tabela 8 – Resultado da análise da rugosidade, após tratamento superficial do alumínio.

Amostras	Tratamento	Medição de rugosidade	Valor médio da	Valor do desvio
----------	------------	-----------------------	----------------	-----------------

		final (Ra)			medição da rugosidade final	padrão da rugosidade final
QMX	químico +mecânico	3,5	3,9	3,6	3,68	0,24
QMY	químico + mecânico	3,7	3,5	3,8	3,63	0,15
QX	Químico	0,8	0,9	0,8	0,85	0,07
QY	Químico	1,0	0,8	0,7	0,82	0,17

Os valores de rugosidade obtidos pelo tratamento químico apresentaram valores inferiores aos medidos pela combinação do tratamento químico e mecânico. A fim de caracterizar os revestimentos utilizados, foi realizado espectroscopia de energia dispersiva de raio X do revestimentos X e Y. A Figura 2 apresenta a microscopia eletrônica de varredura da seção transversal do revestimento X e a Figura 3 apresenta o resultado.

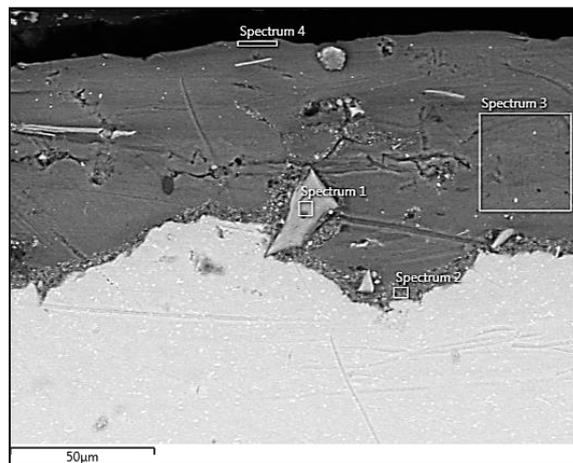
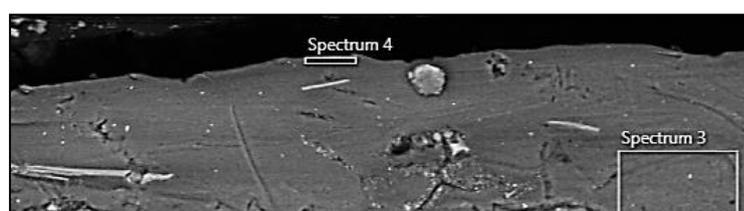


Figura 2 - Microscopia eletrônica de varredura da seção transversal do revestimento antiaderente tipo X para análise de EDS.



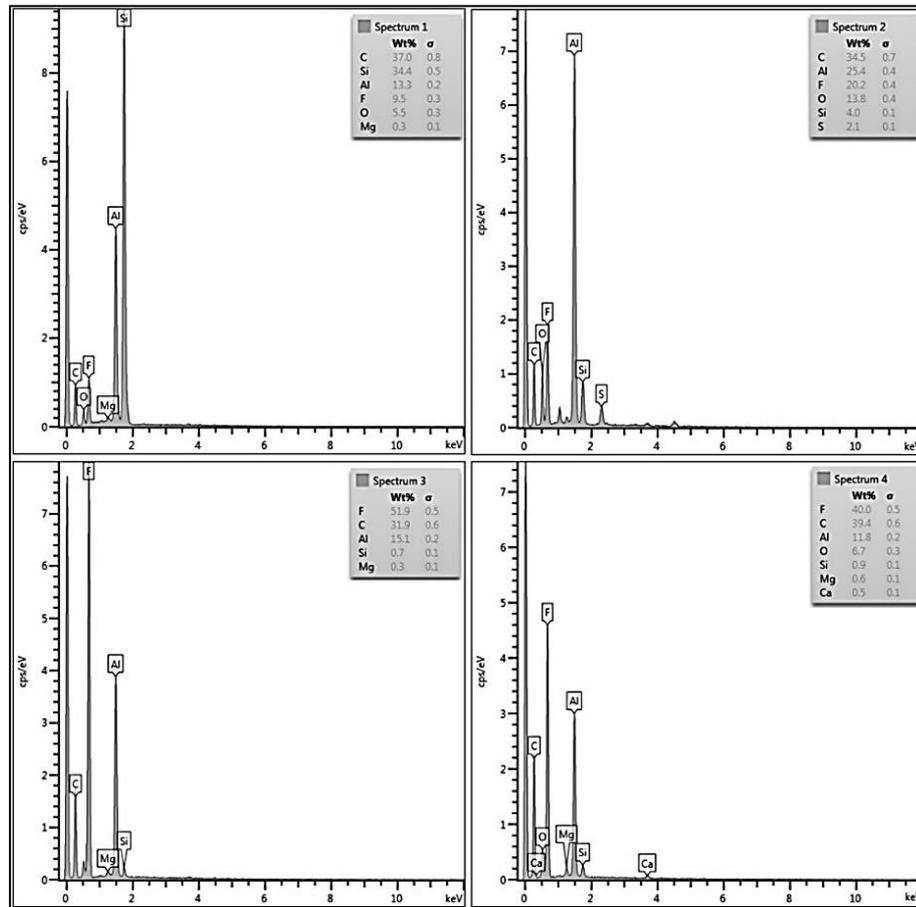


Figura 3 – Resultado do EDS do revestimento antiaderente tipo X.

A Figura 4 apresenta a microscopia eletrônica de varredura da seção transversal do revestimento Y com identificação para análise EDS. A Figura 5 apresenta seu resultado.

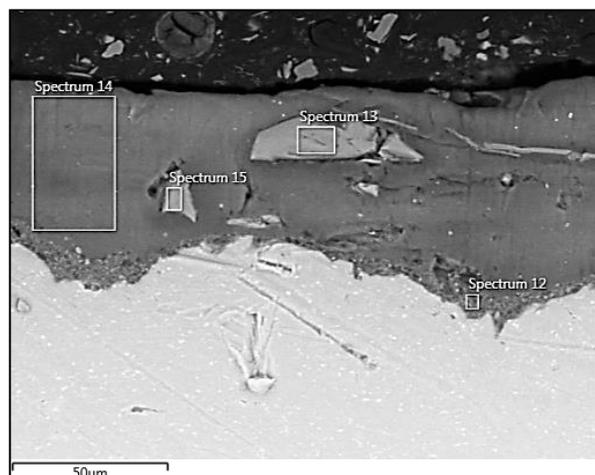


Figura 4 – Microscopia eletrônica de varredura da seção transversal do revestimento antiaderente tipo Y para análise de EDS.

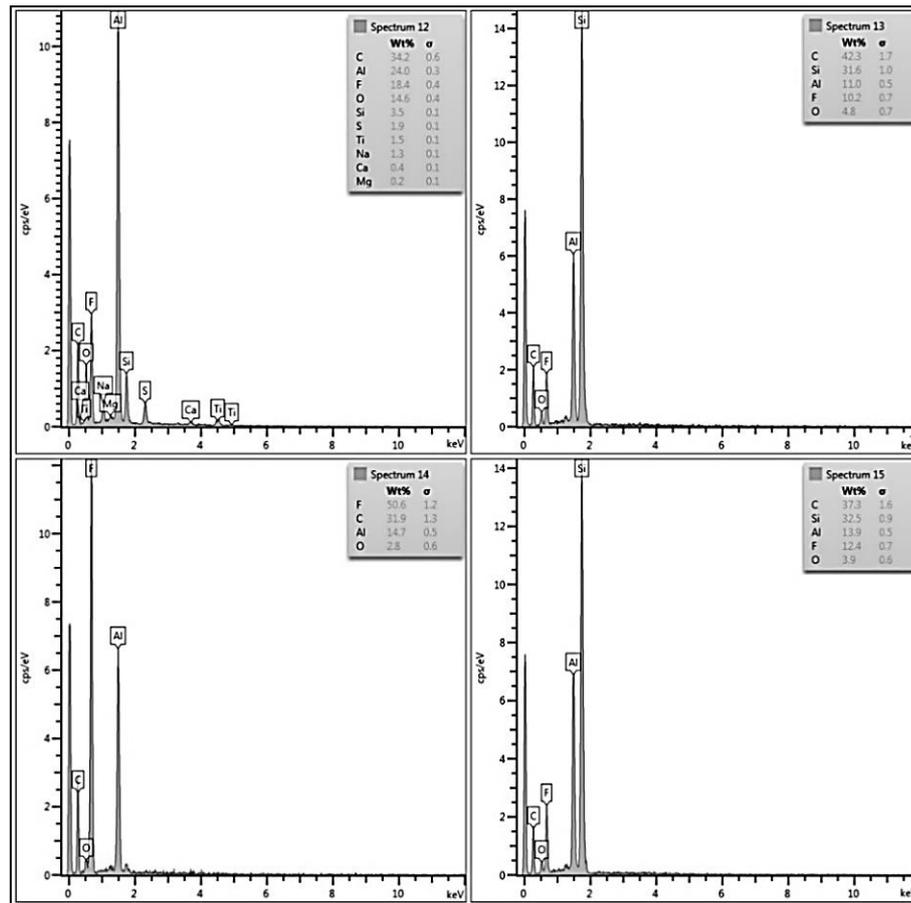


Figura 5 – Resultado do EDS do revestimento antiaderente tipo Y.

Em ambos os revestimentos, foram detectados presença de carbono, silício e alumínio nas partículas maiores (*Spectrum 1* da Figura 2 e *Spectrum 13* e *15* da Figura 4) e presença de flúor, carbono e alumínio nas camadas de mid coat e top coat em ambos os revestimentos dos dois fornecedores.

O método de avaliação da resistência à abrasão foi por comparação, através da estimativa do percentual de alumínio exposto. Para isso, se obteve o valor real desse percentual através de *software ImageJ*. A imagem foi convertida para tons de cinza, pois trabalha com a diferença de tonalidade. O recurso *Threshold*, utilizado para identificar a diferença de tonalidade, apresenta um histograma da imagem e permite realizar a seleção dos pontos em que ocorreu a abrasão, pois apresentam coloração clara, enquanto que o revestimento apresenta coloração escura. O resultado é expresso em percentual dos pontos selecionados em relação a área total do ensaio. A Tabela 9 apresenta o percentual de alumínio exposto para cada amostra após completarem 30.000 ciclos de abrasão.

Tabela 9 – Resultado do ensaio de abrasão SBAR. continua

Amostras	Revestimento	Alumínio exposto (%)	Média	Desvio Padrão
QMX	X	2,86 %	3,20%	1,78
		1,61 %		
		5,12 %		

				conclusão
QMY	Y	0,55 %	1,44%	0,77
		1,92 %		
		1,86 %		
QM	X	0,07 %	0,15%	0,09
		0,24%		
		0,13 %		
QY	Y	0,02 %	0,04%	0,03
		0,03 %		
		0,07 %		

Todas as amostras ensaiadas apresentaram desempenho superior ao exigido pela ABNT NBR 15321 (2), a qual avalia com pontuação máxima um revestimento que complete 5.000 ciclos de abrasão com o máximo de 10 % do metal exposto.

O ensaio de abrasão LGA permite realizar comparação do revestimento em um utensílio, através da diferença de tempo ensaiada e, ao mesmo tempo com outros revestimentos. Ao final do ensaio, a nota total foi obtida com a relação entre os três tempos de ensaio, 15 minutos, 30 minutos e 45 minutos, conforme pode ser verificado na Figura 6.

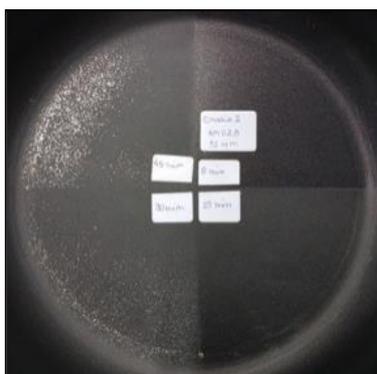


Figura 6 – Representação do resultado do ensaio de abrasão LGA.

A Tabela 10 apresenta o resultado do ensaio de abrasão LGA para todas as amostras.

Tabela 10 – Resultado do ensaio de abrasão LGA.

continua

Amostras	Revestimento	Nota Total	Média	Desvio Padrão	Classificação
QMX	X	3,05	3,05	-	Aceitável
		3,05			
		3,05			
QMY	Y	2,20	2,22	0,13	Bom
		2,35			

		2,10			
conclusão					
QM	X	2,55	2,27	0,13	Bom
		1,95			
		2,30			
QY	Y	2,00	1,98	0,08	Excelente / Bom
		2,05			
		1,90			

Ao realizar avaliação desses resultados levou-se em consideração a pontuação mais próxima ao valor de 1 sendo o melhor resultado obtido, pois significa menor área de exposição de alumínio.

Para a avaliação do ângulo de contato, foi analisada uma gota de cada quadrante (sem abrasão, 15, 30 e 45 minutos de abrasão). Em cada combinação, foram realizados ensaios em três amostras, ao final o valor considerado foi a média entre os valores do ângulo esquerdo e direito, equivalente ao mesmo quadrante. O método de análise de resultado foi através do *software ImageJ* e a Figura 7.

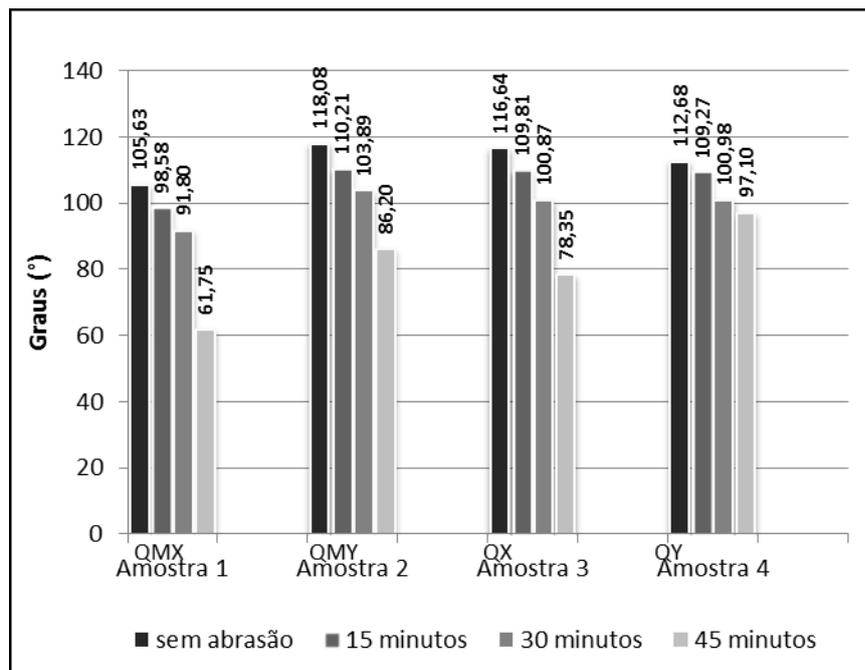


Figura 7 – Resultado do ensaio de gota séssil após ensaio de abrasão LGA.

Levando-se em consideração o valor médio dos ângulos, percebe-se que a medida que aumenta o tempo de abrasão LGA, o valor do ângulo de contato diminui. No ensaio de aderência, todas as amostras ensaiadas apresentaram o mesmo resultado, sem evidências de alteração de um fornecedor para outro de revestimento, pois eventuais variações nas diferentes formulações não devem afetar o desempenho satisfatório do utensílio, os seja, ambos os revestimentos foram classificados como GR0 conforme ABNT NBR 15321 (2).

O resultado do ensaio da durabilidade da antiaderência relaciona a pontuação adquirida no teste de antiaderência com leite no decorrer de ciclos de abrasão. Para a análise dos resultados, levou-se em consideração a pontuação média entre os ensaios realizados.

Tabela 11 - Resultado do ensaio da durabilidade da antiaderência.

Amostras	Revestimento	Nota Total	Média	Desvio Padrão	Classificação
QMX	X	21	16	4,58	Classe A
		12			
		15			
QMY	Y	55	55	NA	Classe C/ D / E
		55			
		55			
QM	X	13	13	2	Classe A
		11			
		15			
QY	Y	55	55	NA	Classe D / E
		55			
		55			

As amostras que receberam o revestimento Y completaram todos os 11 ciclos de antiaderência e os 10 ciclos de abrasão LGA, sendo classificadas como classe A quanto a antiaderência.

A avaliação do resultado do ensaio de corrosão aconteceu através da relação da quantidade de defeitos presentes por decímetro quadrado. As amostras QMY e QY receberam pontuação 5, pois não apresentaram nenhum defeito relacionado à corrosão, já as amostras QMX e QX atingiram pontuação 3, pois exibiram um defeito relacionado à corrosão, por decímetro quadrado.

Discussão

Na análise da composição química do alumínio utilizado nas amostras, a pequena variação encontrada é insignificante, permitindo afirmar que o processo de fundição de alumínio *twin roll caster* não ocasiona diferenças significativas de composição química, conforme identificado no estudo de Fernandes e Padilha (5).

Quanto a rugosidade proporcionada aos dois tipos de pré-tratamento, um estudo realizado por Paulau (6) em dois tipos de aço, (300M-ESR e Maraging 18Ni300) realizado com o objetivo de avaliar o processo da preparação da superfície através do tratamento térmico ou jateamento abrasivo, foi observado que o tratamento térmico proporciona rugosidade (Ra) de 4,32 μm para o aço 300M-ESR e de 2,6 μm para o aço Maraging 18Ni300. Enquanto que o tratamento por jateamento proporciona rugosidade de 6,14 μm para o aço 300-ESR e 4,8 μm para o aço Maraging 18Ni300. Assim, como no estudo de Paulau, no estudo realizado entre tratamento químico (desengraxante alcalino) ou combinado de químico

e mecânico (jateamento) para preparação da superfície do alumínio, observou-se que o jateamento proporciona valor de rugosidade maior. Isso porque o jateamento abrasivo é definido como um processo de preparação de superfícies que utiliza o impacto das partículas abrasivas movimentadas em alta velocidade sobre a superfície, com o objetivo da remoção de materiais contaminantes enquanto que o desengraxante age por interação química, proporcionando um ataque mais leve (7).

As amostras utilizadas nos ensaios de desempenho do revestimento apresentaram espessura de camada de 25 μm a 32 μm . É possível observar que no mesmo tipo de tratamento de superfície, o revestimento X apresenta valores de espessura de camada inferiores ao revestimento Y. valor abaixo do encontrado no estudo de Rossi et al. (8), o qual analisou revestimentos a base de PTFE aplicados em utensílios de cozinha que obtiveram espessura de camada de 35 μm .

Conforme Mckeen (9) a resistência à abrasão, verificada no ensaio de abrasão SBAR, pode ser melhorada pela adição de materiais duros aos revestimentos orgânicos de fluoropolímeros. Comercialmente, esses revestimentos são reforçados com cargas de óxido de alumínio e carboneto de silício.

O estudo de Haering e Schmidt (10) avaliou, em diferentes quesitos, o revestimento anodizado, cerâmico, metálico e antiaderente. Como resultado obteve-se que o revestimento a base de fluoropolímeros Teflon® ficou na segunda colocação dos revestimentos analisados que perdem menos peso no ensaio Taber Abrasion, que avalia a perda de peso. O revestimento anodizado foi o que obteve menos perda de peso, isso porque, esse revestimento é um tratamento de superfície, no qual ocorre uma reação química entre o alumínio e um banho químico tornando a superfície de alta dureza. O ensaio de abrasão SBAR também demonstrou evidências que o revestimento orgânico antiaderente é considerado resistente à abrasão, quando utilizado em utensílios de cozinha, pois todas as amostras atingiram 30.000 ciclos sem exposição de, no máximo, 10 % de alumínio.

No ensaio de abrasão LGA, um estudo realizado em utensílios de cozinha com aplicação de revestimento antiaderente de três camadas, por processo spray obteve pontuação final de 1,99 no ensaio de abrasão LGA. Esse resultado classifica o revestimento como excelente ou bom. Essa categoria compreende os valores para resultado com intervalo de pontuação de 1 a 1,99 (11).

Das combinações analisadas, apenas as amostras QY apresentam pontuação que pode se enquadrar na categoria excelente.

Pires et al.(12) realizou um estudo para verificar a hidrofobicidade, através do ensaio de ângulo de contato, a partir da formação das camadas difusoras em papel ou tecido de carbono com diferentes percentuais de PTFE, a fim de caracterizar o eletrodo de difusão de gás. Em seus resultados, foi possível observar que com a adição de níveis crescentes de PTFE ao substrato, nas amostras de tecido de carbono e de papel de carbono, o caráter hidrofóbico aumentou, resultando em uma elevação nos valores dos ângulos. O tecido de carbono com 60 % de PTFE apresenta ângulo de 152° e o papel de carbono registrou ângulo de 161° . A partir do estudo de Pires et al. (2009) (12) é possível verificar que o PTFE é o principal responsável pelo caráter hidrofóbico e esse é o componente fundamental dos revestimentos utilizados nas amostras. Isso pode ser observado principalmente no ensaio que combina a abrasão LGA e medição do ângulo de contato. Pois, à medida que o tempo de abrasão aumenta, a camada de revestimento diminui, podendo chegar a elevados índices de exposição de alumínio e consequentemente o ângulo de contato diminui.

Sändker; Stollenwerk e Loosen, (13) realizaram uma pesquisa sobre tratamento superficial a laser em alumínio e qual a influência da adesão em revestimentos baseados em

polímeros termoplásticos resistentes a altas temperaturas. O valor inicial da rugosidade era de 0,48 μm e, após tratamento, foram obtidos valores de 0,60 μm a 3,80 μm , conforme variação do tempo de pulso do laser, e verificaram que devido ao pré-tratamento ocorre a adesão do revestimento ao substrato. McKeen (9) explica que a resistência da adesão dos revestimentos a um substrato é aumentada quando aplicada sobre uma superfície rugosa, pois a área é maior que a de uma superfície lisa. Outro fator importante é a limpeza da superfície, que deve ser isenta de contaminantes como, por exemplo, óleos, graxas e resíduos do processo.

Através desse estudo, em que o pré-tratamento da superfície foi realizado de duas maneiras diferentes, uma com uma combinação entre tratamento químico e mecânico e a outra com pré-tratamento apenas químico, foi possível verificar que ambos os tipos de pré-tratamento utilizados em utensílios de cozinha proporcionam limpeza adequada para o processo de aplicação do revestimento, garantindo a adesão ao substrato.

No ensaio da durabilidade da antiaderência, o resultado foi avaliado separadamente em cada grupo de amostras. As amostras QMX e QX foram aplicadas com o mesmo revestimento, porém a superfície das amostras QMX foi preparada com a combinação do tratamento químico e mecânico. Nas amostras QX o pré-tratamento utilizado foi somente químico. No entanto, o mesmo revestimento do tipo X foi aplicado em ambas as amostras que classificaram como classe C, D ou E. As amostras dos grupos QMY e QY também possuem variação do pré-tratamento utilizado e a mesma aplicação do revestimento tipo Y. Esses dois grupos de amostras apresentaram o mesmo resultado com categoria classe A quanto a antiaderência.

A corrosão puntiforme é iniciada por ânions que penetram nos defeitos da camada de óxido natural. Os íons cloretos são adsorvidos no filme de óxido formado pelo próprio alumínio. Na sequência, acontece a ruptura do filme, e a formação do pitting. Onde acontece a ruptura do filme, o alumínio se oxida rapidamente e ocorre a formação de cloreto de alumínio (14).

Gentil (15) explica que os ensaios de corrosão de laboratório são realizados para determinar as consequências do processo de produção e também para determinar se o revestimento contempla as especificações de um ensaio de corrosão com condições especificadas.

Conclusões

Após realização dos ensaios, pode-se concluir que:

- na espessura de camada, as amostras QMX e QX, com revestimento tipo X obtiveram valores de espessura de camada inferior às amostras QMY e QY, com aplicação do revestimento Y;
- na análise de EDS, em ambos os revestimentos analisados, foram detectadas partículas de flúor, carbono, alumínio, oxigênio e silício;
- no ensaio de abrasão SBAR, todas as amostras apresentaram desempenho superior ao exigido pela norma, completando trinta mil ciclos de abrasão sem a exposição de 10% de alumínio. No entanto, o grupo QY apresentou menor exposição do substrato, com valores inferiores a 0,05%;
- no ensaio de abrasão LGA, a amostra QY apresentou resultado considerado excelente, ou bom, considerando o desvio padrão. As amostras QMY e QX classificaram como bom e a amostra QMX, como aceitável, quanto à resistência a abrasão;

- no ensaio de gota séssil, à medida que aumenta o tempo de abrasão LGA, o valor do ângulo de contato diminui;
- no ensaio de aderência, todas as amostras apresentaram resultado satisfatório, sem deslocamento do revestimento;
- no ensaio da durabilidade de antiaderência as amostras QMY e QY obtiveram o melhor desempenho sendo classificadas como classe A quanto a antiaderência, a amostra QMX foi classificada como classe C, D ou E, e a amostra QX classificada como classe D ou E;
- no ensaio de corrosão com NaCl em ebulição, as amostras QMY e QY não apresentaram defeitos relacionados à corrosão, enquanto que as amostras QMX e QX apresentaram um defeito relacionado à corrosão puntiforme.

Desse modo, pode-se concluir que os utensílios do grupo QY, com preparação da superfície química e com o revestimento tipo Y apresentaram os melhores resultados.

Referências bibliográficas

- (1) GOLDSCHMIDT, A.; STREITBERGER, H. J. BASF Handbook on Basics of Coating Technology. 2 ed. Rev. Münster. Vincentz, 2007.
- (2) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15321: Utensílios domésticos de alu-mínio e suas ligas – revestimento antiaderente – avaliação do desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, out. 2013.
- (3) _____. Projeto NBR 15321: Utensílios domésticos de alumínio e suas ligas – revestimento antiaderente – avaliação do desempenho. ABNT, abr. 2017.
- (4) ABAL – Associação Brasileira do Alumínio (Brasil). Guia técnico do alumínio: Laminação, ABAL, 2ª ed, julho de 2004.
- (5) FERNANDES, Ricardo do Carmo e PADILHA, Angelo Fernando. Efeito dos teores de Mn e de Fe na evolução microestrutural de duas ligas do sistema Al-Fe-Mn-Si obtidas por fundição contínua de chapas (Twin Roll Roulette). Rem: Rev. Esc. Minas, 2008, vol.61, n.2, pp.165-169. ISSN 0370-4467.
- (6) PALAU, José Carlos Fortes. Avaliação do processo de preparação de superfície de envelope motor foguete para a aderência de isolante térmico em aços de ultra-alta-resistência. 2011. 163. Dissertação (Mestrado Profissionalizante do Departamento de Engenharia Mecânica) – Universidade de Taubaté, São Paulo, 2011.
- (7) GNECCO, Celso; MARIANO, Roberto e FERNANDES, Fernando. Tratamento de Superfície e Pintura. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Siderurgia, 2003.
- (8) ROSSI, Stefano et al. Functional and perceptive aspects of non-stick coatings for cookware. Materials And Design, Trento, v. 53, p.782-790, 1 jan. 2014. Mensal.
- (9) McKEEN, L. W. Fluorinated coatings and finishes handbook: the definitive user's guide and databook. New York: William Andrew, 2006.
- (10) HAERING, Chad; SCHMIDT, Alex. Evaluation of commercial nonstick Coatings for u.s. army field-feeding Cookware. Through Science. Massachusetts, jun. 2002.
- (11) VERSTEG, André Adriano; BIRRIEL, Eliena Jonko. Avaliação do desempenho de revestimento an-tiaderente à base de politetrafluoroetileno aplicado sobre substratos de Alumínio. In: INTERCORR, 2016. Rio de Janeiro.
- (12) PIRES et al. (2009). Caracterização de eletrodos de difusão de gás de células a combustível do tipo membrana trocadora de prótons. Rev. Matéria, 2009, vol.14, no.4 Rio de Janeiro. ISSN 1517-7076.

- (13) SÄNDKER, Hendrik; STOLLENWERK, Jochen; LOOSEN, Peter. Laser-based process for polymeric tribological coatings on lightweight components. *Surface and Coatings Technology*. Elsevier, 8 set. 2017.
- (14) VARGEL, C.; JACQUES, M.; SCHIMIDT, M. P. *Corrosion of aluminium*. Amsterdam: Elsevier, 2004. 626p.
- GENTIL, Vicente. *Corrosão*. 6.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.