Copyright 2010, ABRACO
Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2010, em Fortaleza/CE no mês de maio de 2010.
As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Otimização do processo de fabricação de peças para a indústria aeronáutica

Faria, M.I.S.T.[1], Robin A.[2], Prisco, L.P.[3], Puccini, M.C.[4], Gonçalves, D.C.[5], Lourenço, J.C.[6], Silva, G.[7]

Abstract

The aluminum alloys from series 7XXX are of considerable technological importance because high ratio mechanical resistance/mass and high corrosion resistance in industrial and marine atmosphere. In the aeronautical sector, they are used for production of parts for control/actuator systems, hydraulics systems and environment systems. The parts go along for four production phases: milling, deburring, non destructive test and surface treatment, contacting several kinds of fluids, degrease solutions and cleaning, could cause superficial defects, rework and scrap. The present work had the objective to study the influence of process parameters in the deburring phase about superficial defects appearance in 7075 alloy parts, specifically, localized corrosion. The work methodology consists: (i) Design of Experiments (DOE): procedure involving intentional changing in process controllable factors observing possible changes of interest answer variable, in this case it was the quantity of surface defects; (ii) Immersion and drying tests: it was performed experiments simulating deburring phase of the industrial process; (iii) Superficial analysis via stereomicroscope; Quantification of superficial corrosion through visual classification defining comparative values for quantity and area of superficial defects. The results showed that, to assure a surface without superficial defects, the parts must be clean and dry using hothouse in 110 ^{o}C. In relation of degreasing process, the degrease bath concentration, immersion time in the degrease solution and the use of pre-cleaning with solvent are factors without significant influence in the quantity of corrosion found. Therefore, those factors do not require a several control in the process. Electrochemical tests showed the 7075 alloy is more resistant for corrosion in a dirty degrease solution than in a clean solution.

Keywords: alloy Al 7075, design of experiments, surface corrosion

[1] Pós doutorado engenharia de materiais, engenheira química, UNIFOA/EEL-USP/Liebherr-Aerospace
[2] Doutorado, engenheiro eletroquímico e eletrometalúrgico, EEL- USP
[3] Pós gradução, engenheira química, Liebherr-Aerospace
[4] MBA, engenheiro mecânico, Liebherr-Aerospace
[5] Gradução engenharia química, EEL-USP
[6] Gradução engenharia materiais, EEL-USP
[7] Gradução engenharia elétrica, EEL-USP

Resumo

As ligas de alumínio da série 7XXX são de considerável importância tecnológica devido à elevada razão resistência mecânica/massa e elevada resistência à corrosão em atmosferas industriais e marinhas. No setor aeronáutico, são usadas para a confecção de peças de sistemas de acionamento/controle, sistemas hidráulicos e sistemas de climatização. Estas peças passam por quatro etapas no processo de fabricação: usinagem, ajustagem/rebarbação, ensaio não-destrutivo e tratamento de superfície, nas quais entram em contato com diversos fluidos, soluções de desengraxamento e de lavagem, que podem gerar defeitos superficiais, retrabalho e refugo. O presente trabalho teve como objetivo estudar a influência dos parâmetros de processo na etapa de ajustagem/rebarbação sobre o aparecimento de defeitos superficiais em peças da liga 7075, especificamente, corrosão localizada. A metodologia do trabalho consistiu de: (i) Delineamento de Experimentos (DOE): procedimento que envolve alterações propositivas em fatores controláveis de um processo de modo a observar possíveis alterações sofridas pela variável resposta de interesse, que neste trabalho foi a quantidade de defeitos superficiais; (ii) Testes de imersão e secagem: foram realizados experimentos simulando a etapa de ajustagem/rebarbação do processo industrial,; (iii) Análise superficial via estéreo microscópio: as peças com defeitos foram selecionadas e avaliadas via estéreo microscópio; (iv) Quantificação da corrosão superficial por meio de uma classificação visual para a qual foram atribuídos valores comparativos para a quantidade e área dos defeitos superficiais. Os resultados mostraram que para a garantia de uma superfície sem o aparecimento de defeitos superficiais, as peças devem estar limpas e secas em estufa a 110 ^{0}C. Em relação ao processo de desengraxamento, a concentração do desengraxante, o tempo de imersão no desengraxante, a temperatura do desengraxante e a utilização da pré-limpeza com o solvente são fatores que não apresentaram influência significativa na quantidade de corrosão encontrada. Portanto, estes fatores não exigem um controle muito rigoroso no processo. Ensaios eletroquímicos mostraram que a liga 7075 é mais resistente à corrosão em solução desengraxante suja do que em solução limpa.

Palavras-chave: liga Al 7075, delineamento de experimentos, corrosão superficial

Introdução

O presente trabalho de pesquisa teve como objetivo estudar o processo de fabricação das peças de Al para uso aeronáutico de forma a identificar possíveis causas de defeitos superficiais, especificamente, corrosão localizada que ocorre durante o processamento destas peças, levando ao aparecimento de pites na superfície. Para o desenvolvimento do trabalho foram estudadas as ligas Al-Zn-Mg-Cu da série 7xxx, de considerável importância tecnológica devido à elevada razão resistência mecânica/massa e elevada resistência à corrosão em atmosferas industriais e marinhas, sendo utilizada em mais de 80 % da massa das aeronaves. [1, 2]

As peças de uso aeronáutico passam por quatro etapas no processo de fabricação: usinagem, ajustagem/rebarbação, ensaio não-destrutivo e tratamento de superfície, nas quais entram em contato com diversos fluidos, soluções de desengraxamento e de lavagem, que podem gerar defeitos superficiais, retrabalho e refugo.

Para a realização dos experimentos, o processo de fabricação das peças foi dividido em quatro mini seqüências experimentais: Usinagem, Ajustagem, Líquido Penetrante e Anodização

Crômica. Neste trabalho, só são apresentados os resultados da mini seqüência da Ajustagem, que consiste de inspeção das peças pelos operadores, que realizam trabalhos de ajustes mecânicos, polimento e rebarbação. Para esta operação as peças que já passaram pela etapa da usinagem e foram banhadas em óleo protetivo contra corrosão sofrem uma limpeza superficial por desengraxamento alcalino, contendo de 3 % a 7 % de *butoxietanol*, entre outros, com o objetivo de remover o óleo. Portanto, nesta etapa, o desengraxe é a etapa simulada experimentalmente a fim de detectar uma possível causa do processo que propicie o aparecimento dos defeitos superficiais. Os experimentos foram elaborados utilizando a técnica de Delineamento Experimental (DOE), de forma a otimizar os ensaios de imersão. [3, 4]

Alguns ensaios eletroquímicos foram realizados em soluções de desengraxamento com as quais as peças de alumínio entram em contato durante o processo.

Materiais e Métodos

As amostras utilizadas foram obtidas do corte longitudinal de peças da liga 7075T73, cuja composição está mostrada na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, mantendo sempre o mesmo modelo da peça, a fim de trabalhar com área e forma mais próximas possível das utilizadas na linha de produção.

A Figura 1 mostra o processo de limpeza superficial realizada antes da inspeção das peças na seção da Ajustagem.

Os experimentos foram realizados utilizando o Delineamento de Experimentos, que pode ser definido como um procedimento que envolve alterações propositivas em fatores controláveis de um processo ou produto, de modo que se possa observar as possíveis alterações sofridas pelas variáveis resposta de interesse, bem como as razões destas alterações. Os fatores são variáveis que sofrem mudanças de forma controlada no experimento com o objetivo de se observar seu impacto sobre a variável resposta. Cada fator deve estar associado com valores específicos, quantitativos ou qualitativos que correspondem aos níveis.

Para a execução da seqüência experimental utilizando Planejamento de Experimentos foram elencados, com base no fluxograma do processo os fatores, que poderiam influenciar no aparecimento dos defeitos superficiais. Para cada fator, foram empregados dois níveis estabelecidos utilizando um valor próximo do usado na linha de produção e outro nível extrapolando este valor. O fluxograma da Figura 1 destaca os fatores estudados em cada etapa do processo.

A

mostra e descreve os fatores e níveis avaliados na mini seqüência da Ajustagem. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra parte da planilha de experimentos gerada pelo planejamento de experimentos de fatorial fracionado, utilizando o software Minitab. Só são mostradas as condições dos primeiros ensaios (1 a 9) devido ao grande número de experimentos. Foram utilizados 128 corpos-de-prova para a realização dos experimentos. No total, foram realizados 320 experimentos, pois um dos fatores estudados foi a repetição da etapa de limpeza superficial da peça por quatro vezes. A superfície dos corpos-de-prova foi analisada antes e após a imersão utilizando o estéreo microscópio Leica modelo MZ 9,5.

Os defeitos superficiais encontrados foram visualmente classificados e quantificados em relação ao número de ocorrência de corrosão e de área ocupada por ela. Esta quantificação da corrosão foi utilizada como variável resposta no planejamento de experimentos. Os resultados

obtidos foram alimentados na planilha de experimentos no software Minitab, com o qual se pode verificar quais os fatores e interações entre eles que podem influenciar a ocorrência de defeitos durante o processo de ajustagem. Consideraremos significativos somente os fatores principais e as interações de segunda ordem.

Os ensaios eletroquímicos [5] foram realizados em soluções de desengraxamento limpa (antes do uso na linha de produção) e suja (no momento da troca da solução na linha de produção devido a saturação). A temperatura das soluções foi a ambiente. Amostras cilíndricas das peças da liga 7075 foram embutidas em suportes de PTFE deixando uma área exposta de 0,3 cm^2. Antes de cada experimento, os corpos-de-prova foram lixados com papel abrasivo até a grana 600, lavados com água destilada e secos. Foi utilizada uma célula de três eletrodos, sendo uma chapa de platina o contra-eletrodo e o eletrodo de calomelano saturado (ECS) o de referência. O estudo eletroquímico foi conduzido seguindo a seguinte sequência de experimentos: 1- medidas do potencial em circuito aberto por duas horas; 2- medidas de impedância eletroquímica no potencial de corrosão usando uma amplitude de sinal de 10 mV e varrendo a frequência de 100 kHz a 0,1 Hz; 3- polarização potenciodinâmica com velocidade de varredura de 1 mV/s.

Resultados e Discussão

Ensaios de imersão

Após análise da superfície das peças, nove peças apresentaram defeitos superficiais: E15, E23, E25, E30, E39, E47, E73, E93, E118. Estes defeitos são ilustrados na Figura 2. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra a planilha utilizada para a execução dos experimentos das peças que apresentaram corrosão superficial.

A Figura 3 mostra o gráfico de Pareto indicando os principais fatores de influência no processo de ajustagem como os que ultrapassaram a linha de Lenth´s (em vermelho):

- D: água de limpeza da peça.

- H: tempo para olear:

- BE: interação entre Quantidade de desengraxamento e Saturação do desengraxante.

- GH: interação entre Temperatura na estufa e Tempo para olear.

- DF: interação entre Água de limpeza da peça e Tempo na estufa.

- DH: interação entre Água de limpeza da peça e Tempo para olear.

A Figura 4 apresenta o gráfico de interação entre tempo na estufa e qualidade da água utilizada para limpeza das peças após imersão no desengraxante. Analisando esta interação, pode-se observar que a melhor condição (menor quantidade de corrosão) foi encontrada com 15 min e água de limpeza na condição limpa (ponto 1). A pior situação encontrada foi a condição de 15 minutos na estufa após limpeza com água concentrada (ponto 4). Ressalta-se que a quantificação de corrosão realizada não permite uma distinção entre os pontos 1, 2 e 3. Portanto, observa-se que para a condição de água limpa, o tempo na estufa não influencia a quantidade de corrosão e que para o tempo de permanência na estufa de 180 min a qualidade da água não interfere nos resultados obtidos. Conclui-se que:

- se a peça estiver seca, a qualidade da água de limpeza utilizada não influencia na quantidade de corrosão;

- ao utilizar a água de limpeza na condição concentrada, a peça deve ficar mais tempo na estufa para apresentar uma menor quantidade de corrosão superficial.

A Figura 5 apresenta o gráfico de interação entre Tempo para olear e Temperatura na estufa utilizada para a secagem das peças após desengraxamento. Analisando esta interação, pode-se observar que a melhor condição (menor quantidade de corrosão) foi encontrada com temperatura da estufa de 50 ^{o}C e 6 horas para olear (ponto 1). A pior situação encontrada foi temperatura da estufa de 50 ^{o}C e 24 horas para olear (ponto 2). Ressalta-se, no entanto, que a quantificação de corrosão realizada não permite uma distinção entre os pontos 1, 3 e 4. Portanto, observa-se que para a condição de temperatura na estufa de 110 ^{o}C, o tempo sem olear não influencia a quantidade de corrosão e que para o tempo sem olear de 6 horas as temperaturas da estufa utilizadas não interferem nos resultados obtidos. Conclui-se que uma menor quantidade de corrosão superficial é obtida quando a umidade da peça é retirada, o que é conseguido com a utilização da estufa à 110 ^{o}C.

A Figura 6 mostra a interação entre o tempo para olear e a qualidade da água utilizada para limpeza das peças após desengraxamento. Para análise do gráfico vale ressaltar que o método de quantificação utilizado não permite a distinção entre os pontos 1, 2 e 3. A pior situação encontrada foi a utilização de água concentrada para limpeza das peças e tempo para olear de 24 h (ponto 4). Observa-se que com a utilização de água limpa para limpeza, o tempo sem olear causa praticamente nenhum efeito na quantidade de corrosão. No entanto, utilizando-se água concentrada para limpeza das peças, o tempo sem olear pode influenciar na quantidade de corrosão apresentada (comparação entre os pontos 1 e 4). Conclui-se que se a peça for limpa corretamente pode ficar 24 horas sem olear sem acarretar o aparecimento de defeitos superficiais.

A Figura 7 mostra a interação entre a quantidade de desengraxe e saturação do desengraxante. Para análise do gráfico vale ressaltar que o método de quantificação utilizado não permite a distinção entre os pontos 2 e 3 e entre os pontos 1 e 4. As piores situações encontradas são uso de desengraxante sujo e quatro repetições (ponto1) como também, um desengraxe em desengraxante limpo (ponto 4). Observa-se que para o uso do desengraxante sujo, quanto maior o número de repetições, maior a quantidade de corrosão encontrada. Isto pode ser justificado porque a peça vai passar um maior número de vezes pelo desengraxante sujo, o que poderia levar ao acúmulo de sujeira e oleosidade na superfície. No entanto, observa-se que com o uso do desengraxante limpo, quanto maior o número de desengraxe menor a quantidade de corrosão. Este resultado não faz sentido, uma vez que o desengraxe não é capaz de retirar corrosão da superfície da peça. Pode-se observar que para os casos de uma repetição, o uso do desengraxante sujo apresenta uma quantidade de corrosão menor do que o uso do desengraxante limpo.

Este fato foi comprovado pelos ensaios eletroquímicos realizados usando diversos corpos-de-prova retirados de peças de Al7075. A Figura 8 mostra a evolução do potencial em circuito aberto da liga Al7075 em soluções desengraxantes limpa e suja. Ambos potenciais evoluem na direção dos potenciais nobres e se estabilizam em valores próximos, demonstrando o estado passivo da liga nas duas soluções. A forma das curvas de polarização da liga 7075 em ambas as soluções desengraxantes é similar e característica de materiais passivos (Figura 9). As densidades de corrente de corrosão da liga determinadas pelo método de extrapolação são 6.10^{-7} A cm^{-2} e 4.10^{-7} A cm^{-2} nas soluções limpa e suja, respectivamente.

A Figura 10 apresenta o diagrama de impedância (Nyquist) obtido para a liga Al7075 em soluções desengraxantes limpa e suja no potencial de corrosão. O diagrama apresenta semi-arcos capacitivos para ambas as soluções. O diâmetro maior do arco obtido para a solução

desengraxante suja é indicativo de uma maior resistência à corrosão da liga Al7075 neste meio. De fato, a simulação dos dados experimentais usando o circuito equivalente de Randles $R_S(R_P$-CPE) [5] aponta uma resistência de polarização em torno de 185 kΩ cm^2 e 377 kΩ cm^2 para a liga Al7075 nas soluções desengraxantes limpa e suja, respectivamente.

Como uma proposta de modificação na linha de produção para amenizar a ocorrência de corrosão localizada em peças de Al7075, é apresentado na Figura 11 o fluxograma do processo da etapa da ajustagem com as condições que devem ser controladas (em vermelho) e aquelas que não influenciam significativamente (em laranja) ou não interferem (em verde) no aumento da quantidade de corrosão.

Conclusões

Do estudo da influência dos parâmetros de processo na etapa de ajustagem de peças de Al7075 e de suas interações sobre a ocorrência de corrosão superficial, as seguintes observações podem ser levadas para se obter uma menor quantidade de corrosão:

a. o tempo de permanência na estufa (após desengraxe e lavagem) e o tempo para olear as peças não tem influência quando se utiliza água limpa para a limpeza após desengraxe;
b. ao utilizar água concentrada para limpeza superficial da peça, deve-se secar muito bem a peça e essa deve permanecer o menor tempo possível sem proteção;
c. para temperatura da estufa de 110 ^oC, a peça pode ficar até 24 horas sem olear.

Em relação ao processo de desengraxamento, a concentração do desengraxante, o tempo de imersão no desengraxante, a temperatura do desengraxante e a utilização da pré-limpeza com o solvente são fatores que não apresentaram influência significativa na quantidade de corrosão encontrada. Portanto, estes fatores não exigem um controle muito rigoroso no processo.

Com base nos resultados obtidos neste trabalho foram propostas modificações no processo de ajustagem que contribuem para a melhoria da qualidade e redução no tempo de fabricação das peças.

Referências bibliográficas

1 LI, J.F., PENG, Z.W., JIA, Z., CHEN, W., ZHENG, Z. Mechanical properties, corrosion behaviors anda microtructures of 7075 aluminium alloy with various aging treatments. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, v.18, p.755-762, 2008.

2 SAVAS, T.P., EARTHMAN, J.C. Surface Characterization of 7075-T73 Aluminum Exposed to anodizing preteatment solutions. ASM International. v. 17(5), p.674-677, 2008.

3 - ROSS, P.J., Aplicações das técnicas Taguchi na Engenharia da Qualidade. 5ed. MacGraw-Hill, 1991.

4 Apostila de Treinamento DOE - Grupo Werkema, 2009.

5 S.WOLYNEC. Técnicas eletroquímicas em corrosão. Editora Universidade de São Paulo. São Paulo. 2003.

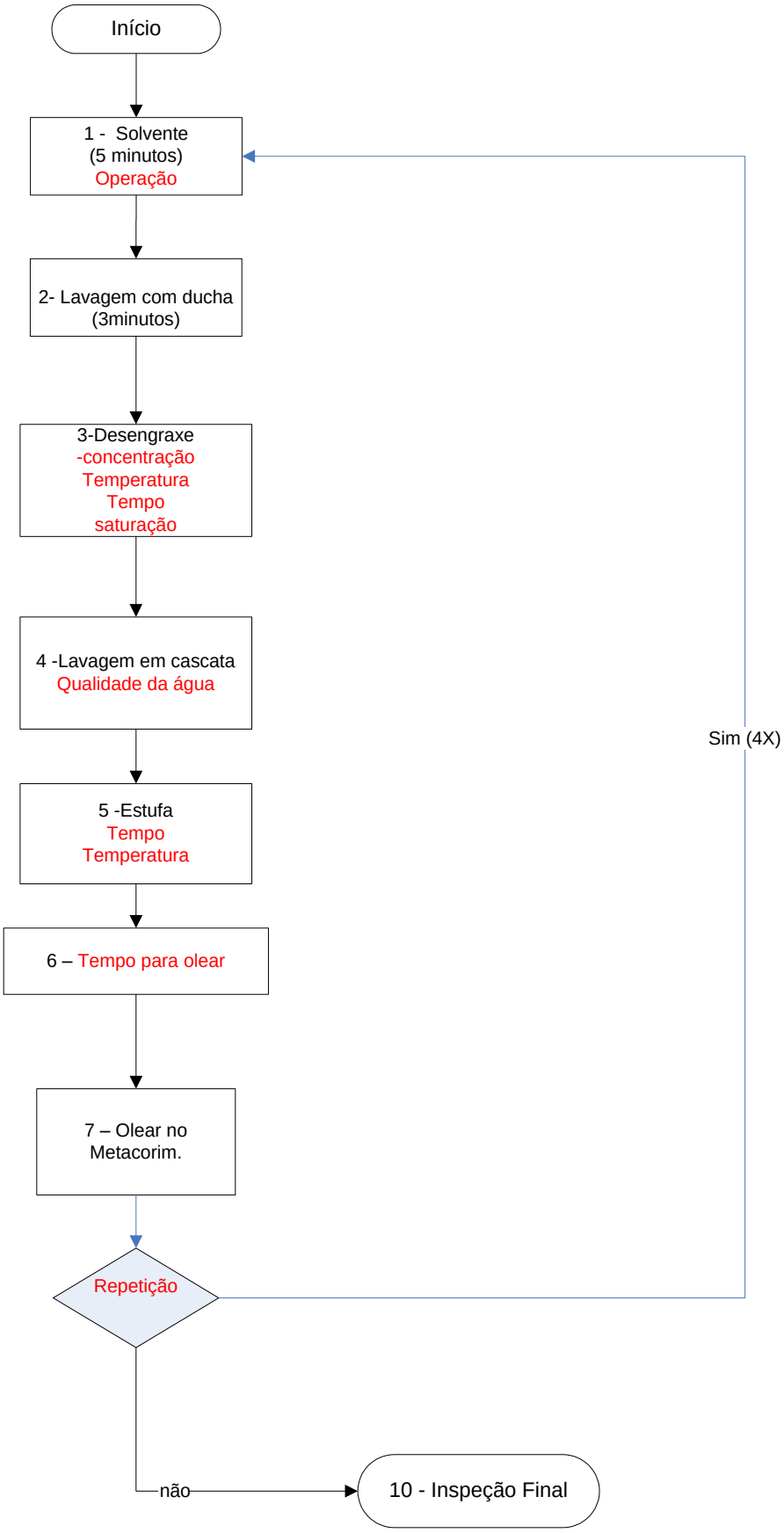
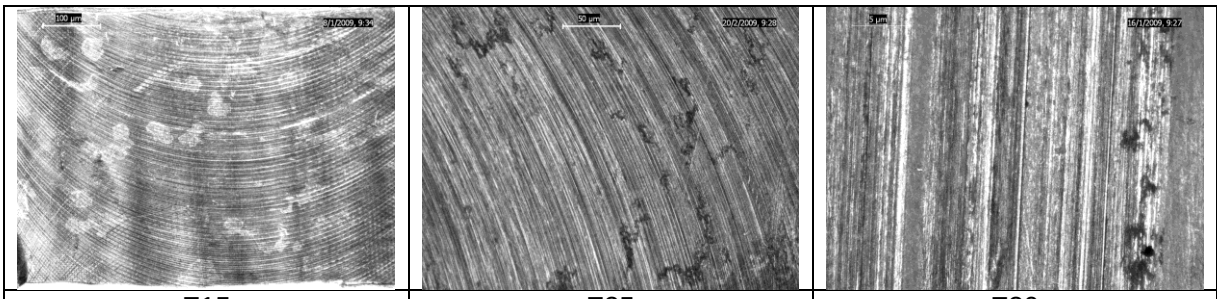


Figura 1 - Fluxograma do processo de limpeza superficial realizada na etapa de ajustagem (em destaque os fatores estudados em cada passo).



E15	E25	E30

Figura 2 – Algumas imagens das superfícies obtidas via estéreo microscopio das amostras que apresentaram corrosão superficial.

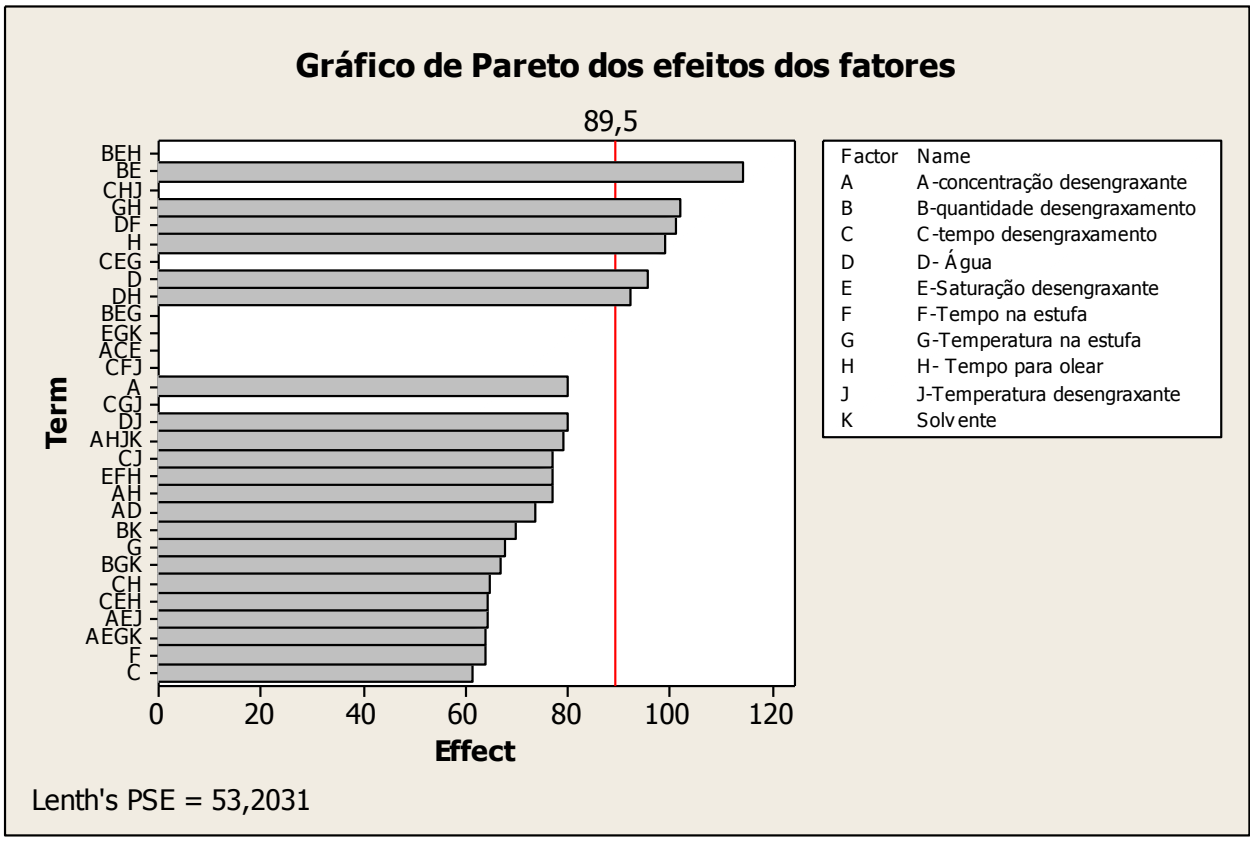


Figura 3 - Gráfico de Pareto dos efeitos principais e interação entre eles.

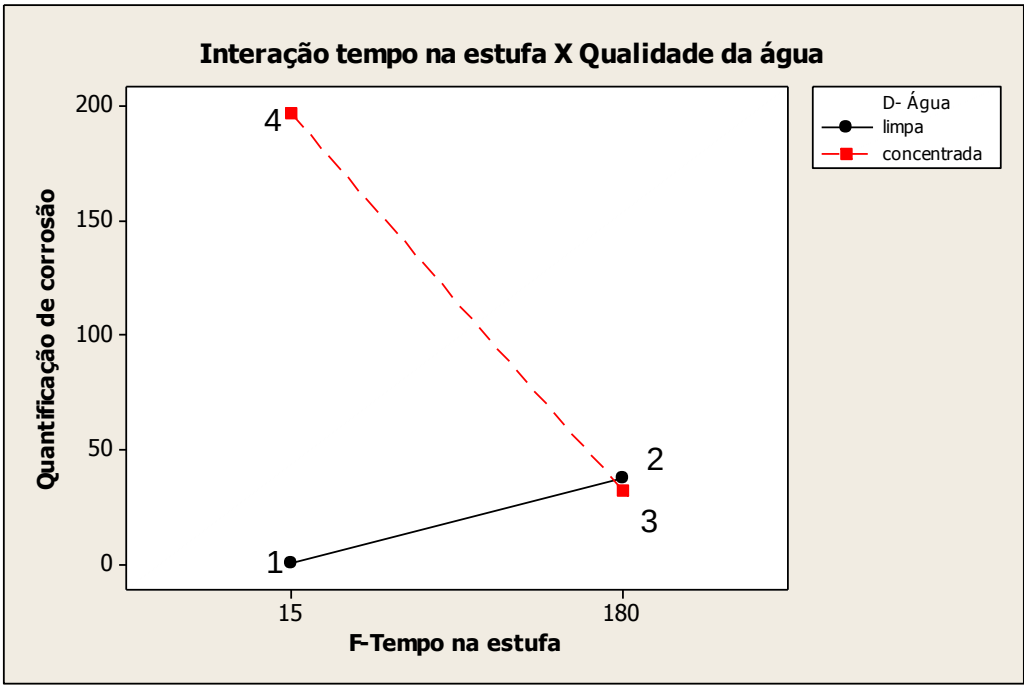


Figura 4 - Gráfico da interação entre Tempo na estufa e Qualidade da água.

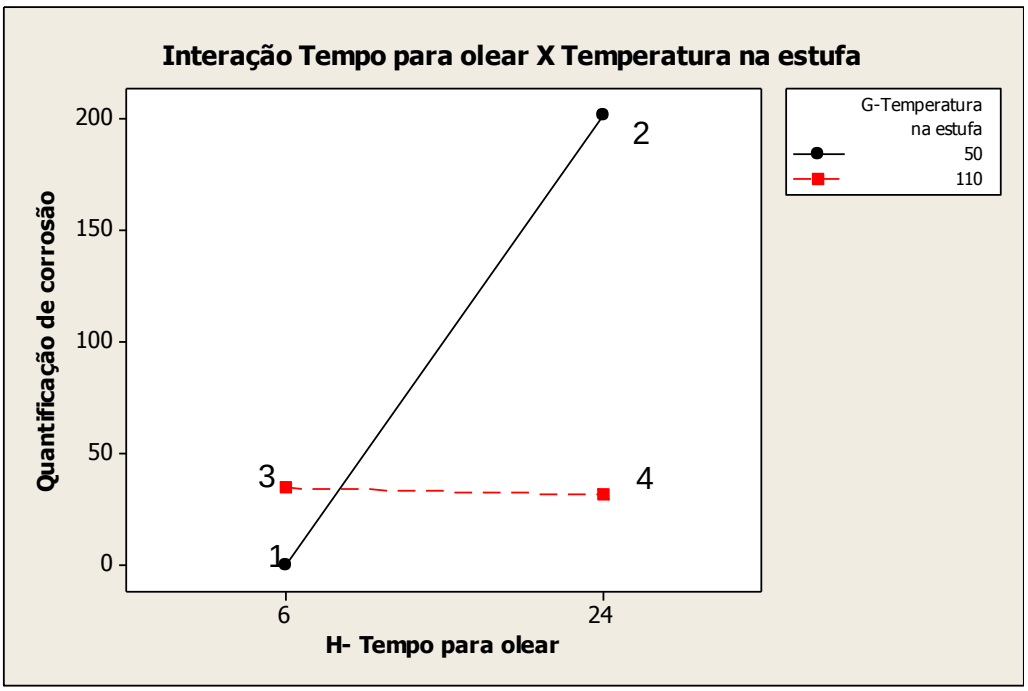


Figura 5 - Gráfico de interação entre Tempo para olear e Temperatura na estufa.

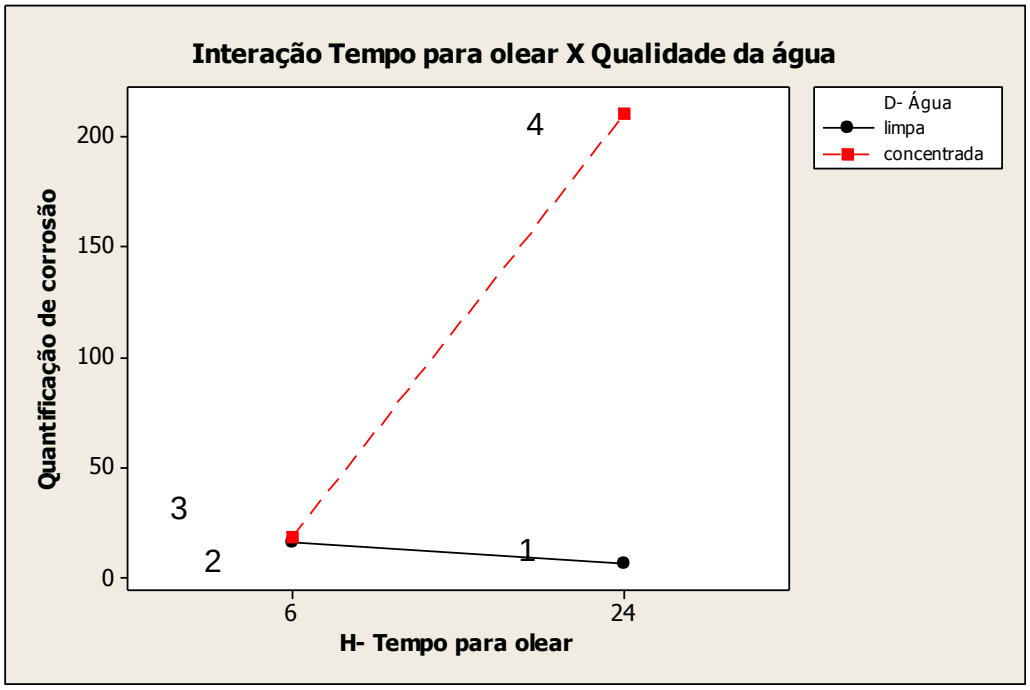


Figura 6 - Gráfico de interação entre Tempo para olear e Qualidade da água.

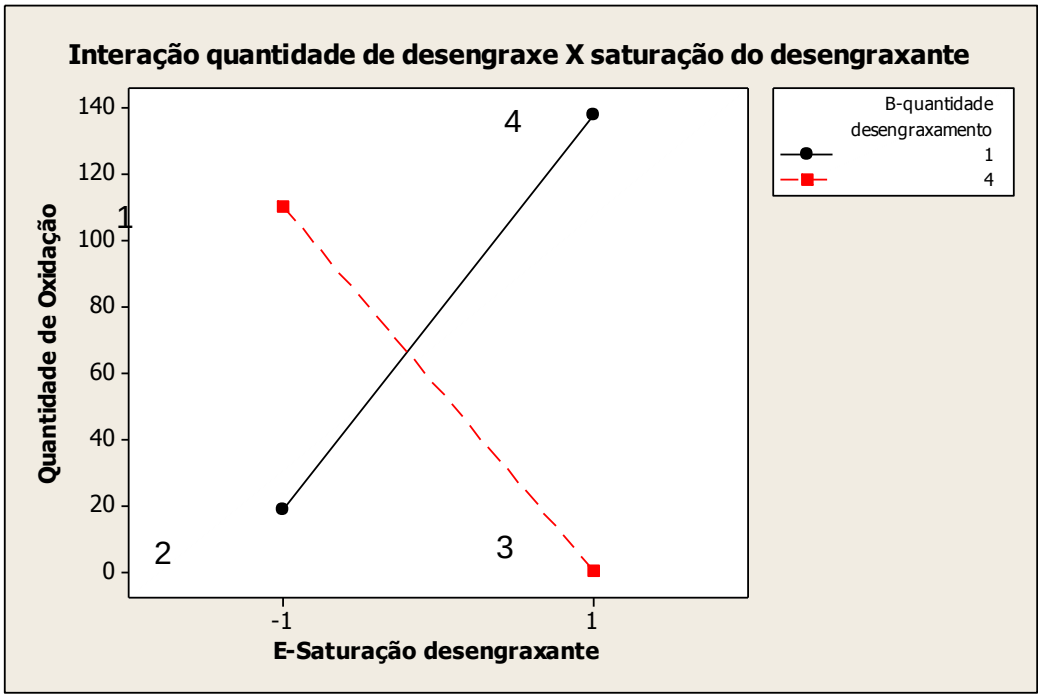


Figura 7 - Gráfico de interação entre Quantidade de desengraxe e Saturação do desengraxante.

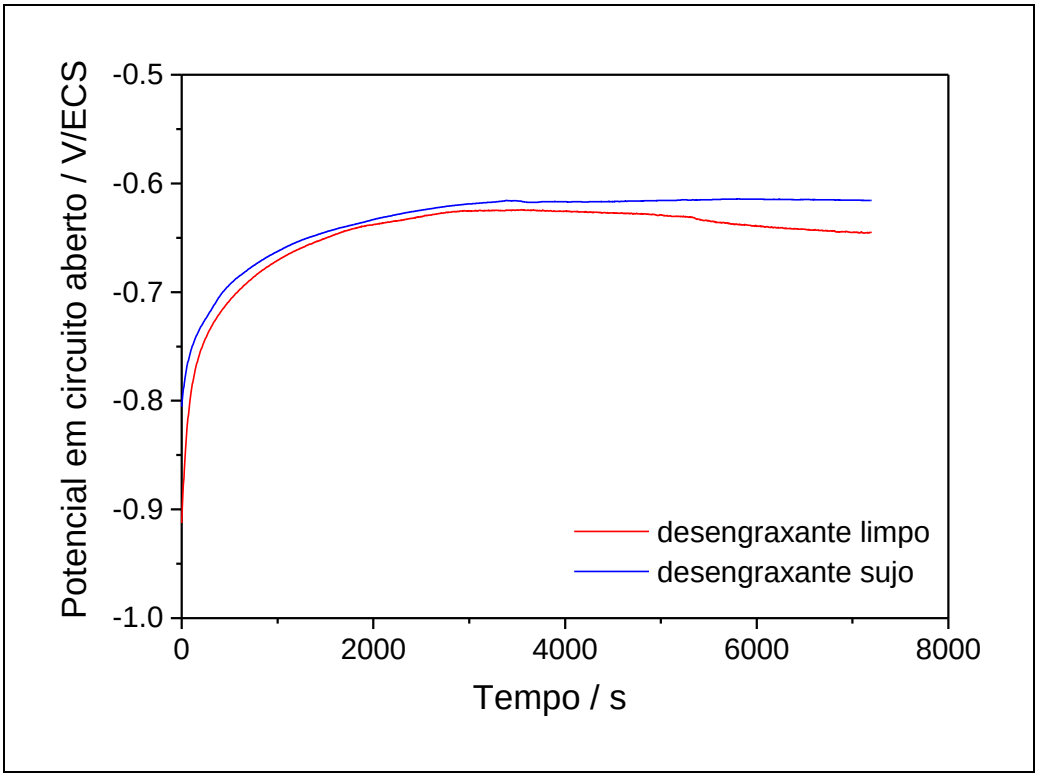


Figura 8– Evolução do potencial em circuito aberto da liga Al7075 em função do tempo em soluções desengraxantes limpa e suja.

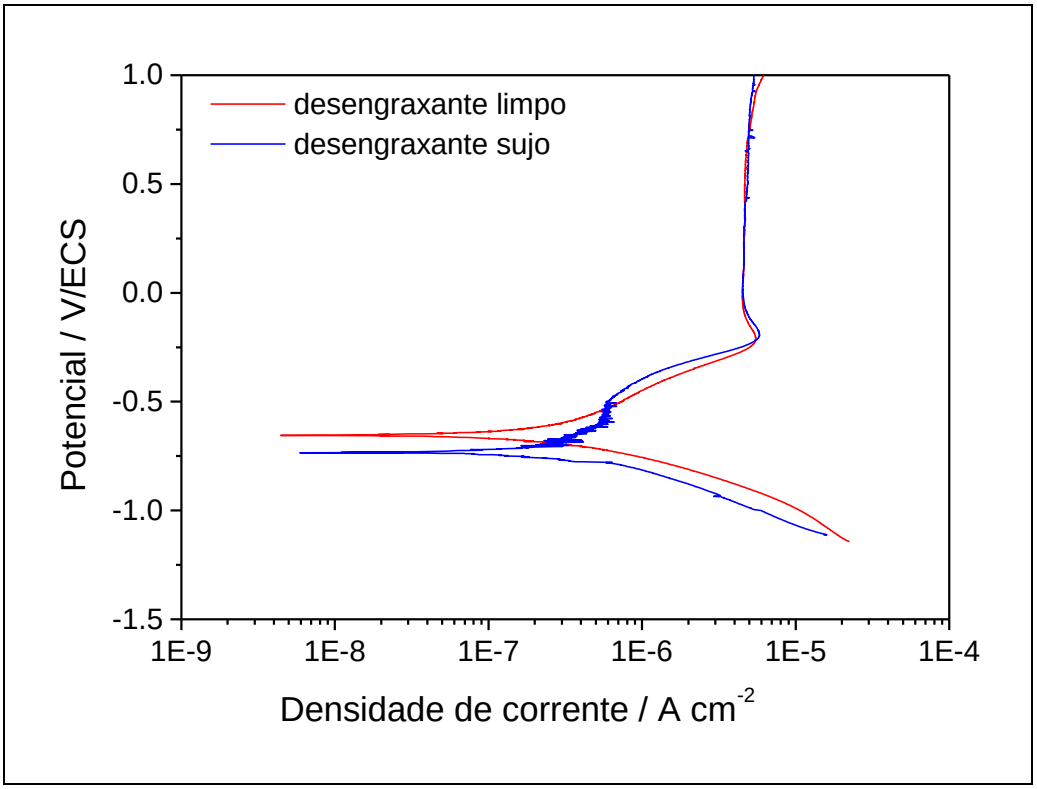


Figura 9– Curvas de polarização da liga Al7075 em soluções desengraxantes limpa e suja.

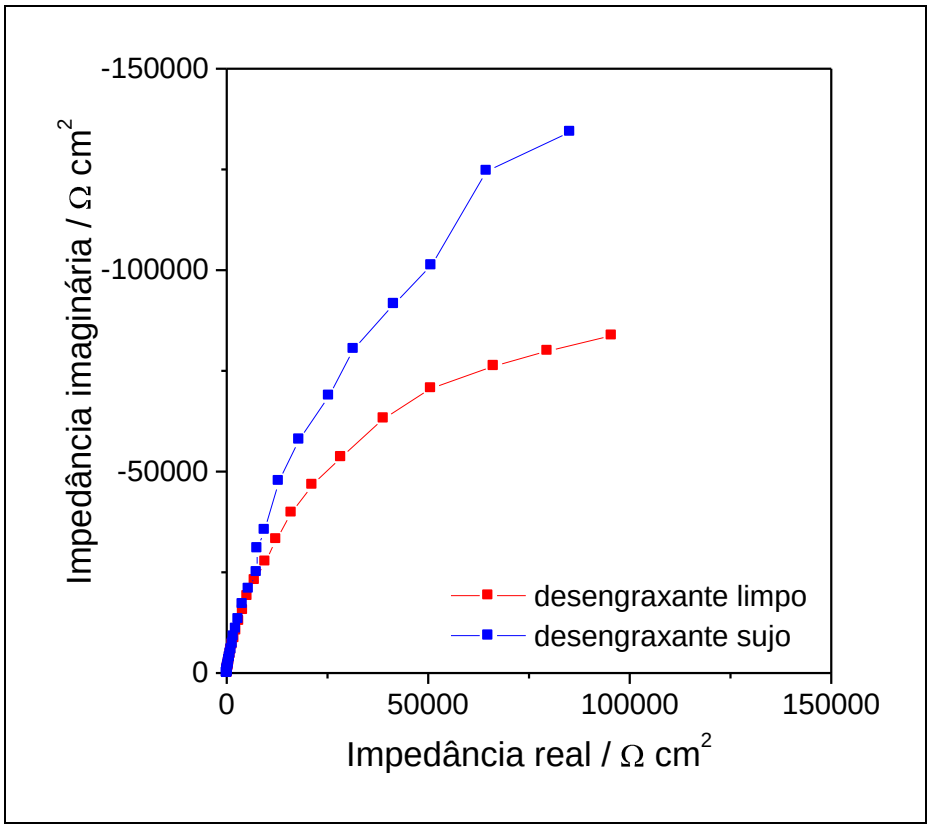


Figura 10– Diagrama de Nyquist da liga Al7075 em soluções desengraxantes limpa e suja.

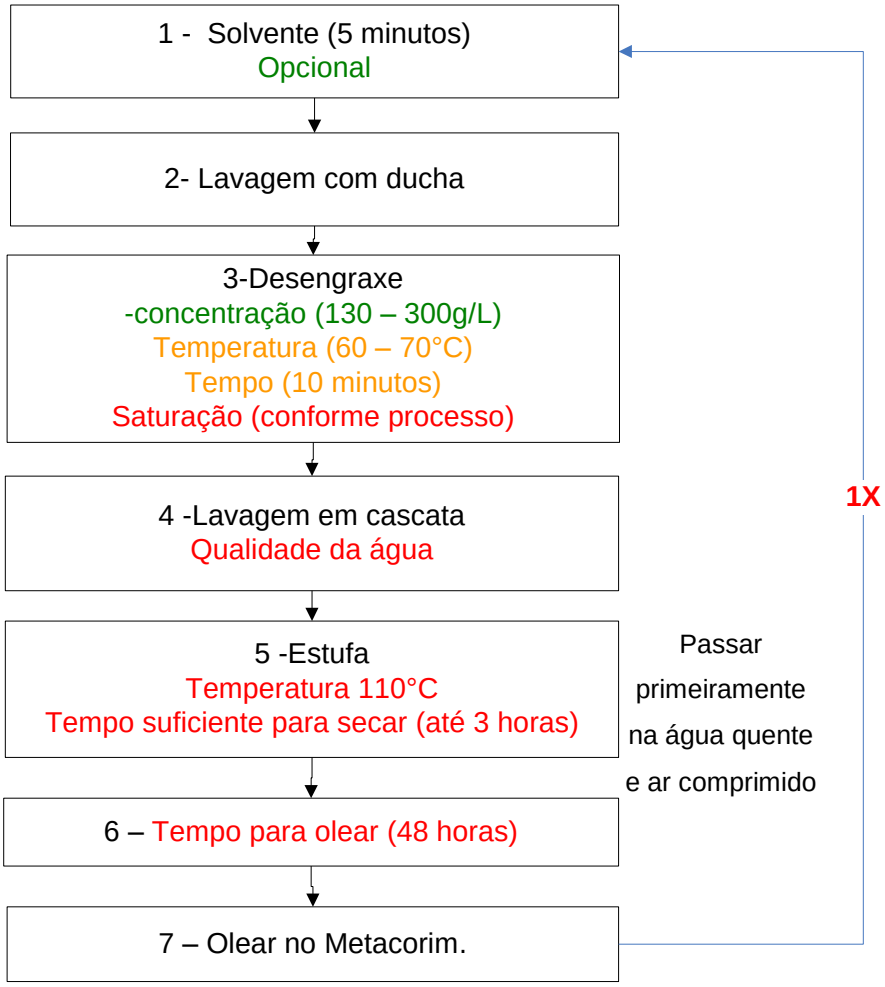


Figura 11- Fluxograma do processo de desengraxe com os fatores que podem influenciar a quantidade de corrosão.

Tabela 1 - Composição em %massa da liga 7075T73 utilizada para os testes de imersão e eletroquímicos.

	Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mn (%)	Mg (%)	Ti (%)	Zn (%)	Cr (%)
7075T73	0,4	0,5	1,2-2,0	0,3	2,1-2,9	0,2	5,1-6,1	0,18-0,28

Tabela 2 - Fatores e níveis avaliados na mini seqüência da Ajustagem.

Fatores	Nível 1	Nível 2	descrição
A- Concentração do desengraxante	150 g/L	300 g/L	Desengraxante: preparado e analisado conforme norma interna
B- Quantidade de desengraxamento	1	4	Repetir de 1 a 4 vezes o processo de desengraxamento, lavagem e secagem conforme estabelecido nos fatores.
C- Tempo de desengraxamento	5 min	20 min	Tempo cronometrado de imersão no desengraxante.
D- Àgua	limpa	suja	Utilizar como nível 1 uma água deionizada logo após a troca do tanque e como nível 2 o tanque após 2 dias de uso intenso na produção.
E- Saturação do desengraxante	limpo	sujo	Utilizar como nível 1 uma solução logo após preparo e medir sua condutividade. Como nível 2 utilizar uma solução após 20 dias de uso e medir sua condutividade.
F- Tempo na estufa	15 min	180 min	Tempo de permanência da peça na estufa para secagem após imersão no desengraxante.
G- Temperatura na estufa	55°C	110°C	Temperatura da estufa regulada no próprio equipamento
H- Tempo para olear	6 h	24 h	Tempo que a peça fica sem proteção (óleo protetivo) a fim de simular o tempo durante o qual o operador executa a ajustagem ou rebarbação.
I- Temperatura do desengraxante	25 ^{o}C	65 ^{o}C	Temperatura do banho de imersão.
J- Solvente	sim	não	Operação de pré-desengraxe

Tabela 3 - Parte da Planilha seguida para elaboração dos experimentos (os fatores de A-J estão identificados e descritos na Tabela 1).

Experimento	A-	B	C-	D-	E-	F-	G-	H-	I	J
1	130	1	5	limpa	suja	15	50	24	65	sim
2	300	1	5	limpa	suja	15	50	6	65	não
3	130	4	5	limpa	suja	15	50	6	25	sim
4	300	4	5	limpa	suja	15	50	24	25	não
5	130	1	20	limpa	suja	15	50	6	25	não
6	300	1	20	limpa	suja	15	50	24	25	sim
7	130	4	20	limpa	suja	15	50	24	65	não
8	300	4	20	limpa	suja	15	50	6	65	sim
9	130	1	5	suja	suja	15	50	24	25	não

Tabela 4 – Planilha mostrando as condições experimentais utilizadas para a execução dos testes de imersão das peças que apresentaram defeitos superficiais.

Experimento	A - concentração desengraxante	B-quantidade desengraxamento	C-tempo desengraxamento	D- Água	E-Saturação desengraxante	F-Tempo na estufa	G- Temperatura na estufa	H- Tempo para olear	J-Temperatura desengraxante	Solvente
15	130	4	20	concentrada	suja	15	50	24	25	sim
23	130	4	20	limpa	limpa	15	50	24	25	não
25	130	1	5	concentrada	limpa	15	50	24	65	não
30	300	1	20	concentrada	limpa	15	50	24	25	não
39	130	4	20	limpa	suja	180	50	24	65	sim
47	130	4	20	concentrada	suja	180	50	24	25	não
73	130	1	5	concentrada	suja	15	110	6	25	não
93	130	1	20	concentrada	limpa	15	110	24	25	sim
118	300	1	20	limpa	limpa	180	110	6	65	não