



Dina Francisco Domingues

**Otimização do processo de decapagem química
numa empresa de produção de perfis de aço**

Dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia Química, apresentada ao
Departamento de Engenharia Química da Faculdade de Ciências e Tecnologia
da Universidade de Coimbra.

Julho 2015



UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Dina Francisco Domingues

Otimização do processo de decapagem química numa empresa de produção de perfis de aço

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências
e Tecnologia da Universidade de Coimbra com vista
à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química.

Orientadores

Professor Doutor Lino de Oliveira Santos
Engenheiro José António Gonçalves dos Santos

Colaboração institucional

Böllinghaus Steel, S.A.



Julho 2015



UNIVERSIDADE DE COIMBRA

“O mundo está nas mãos daqueles que têm a coragem de sonhar e de correr o risco de viver seus sonhos.”

Paulo Coelho

Agradecimentos

A todos os colaboradores da Böllinghaus Steel, pela oportunidade de realizar a dissertação em excelentes condições de trabalho.

Ao Engenheiro José Santos, à Engenheira Ana Ferreira e ao Engenheiro Nélio Mourato, por toda a ajuda, disponibilidade e transmissão de conhecimentos durante seis meses de estágio.

Um especial obrigado à Engenheira Ana Ferreira por ter transmitido os seus conhecimentos sobre o processo da decapagem.

Pela partilha de todos os momentos no gabinete, um especial obrigado aos Engenheiros da Produção.

Ao Professor Doutor Lino Santos, por todo o apoio demonstrado e pelo tempo que generosamente dedicou ao acompanhamento da dissertação.

Ao Professor Doutor Amílcar Ramalho, por todos os conhecimentos transmitidos relativamente à caracterização do aço inoxidável e disponibilidade demonstrada. Obrigada pela ajuda nos ensaios de microscopia ótica e pela cedência das respetivas imagens.

À Scanacon pelos esclarecimentos relativos aos equipamentos de recuperação de ácidos para o setor da decapagem, e pelo direito de uso das imagens apresentadas ao longo do trabalho.

À minha família, pelo apoio incondicional, incentivo e força que sempre me transmitiram ao longo destes anos. Obrigado por acreditarem nas minhas capacidades e por me terem proporcionado esta experiência inesquecível que foi a vida universitária.

Ao meu avô Manuel Francisco, que mesmo não estando presente me dá muita força e determinação. Obrigado por me ensinarem que com trabalho e dedicação tudo se concretiza e a felicidade é alcançada!

Ao Rúben, meu namorado por estar sempre do meu lado em todos os momentos, e em especial pelo constante apoio, força e paciência nestes últimos meses. Obrigado por tudo!

Pela partilha de todos os momentos académicos, entreajuda e amizade, agradeço à Cátia Gaspar, Carolina Pinheiro, Inês Leal, Tânia Marques e Tânia Sintra por tudo.

A todos que de alguma forma me ajudaram a concretizar este sonho, o meu sincero agradecimento.

Resumo

Este trabalho incide sobre o setor de decapagem química de perfis de aço inoxidável na empresa Böllinghaus Steel S.A. O processo da decapagem química é um dos principais procedimentos do processo de acabamento dos perfis de aço, e consiste na transformação do aço em estado negro para aço brilhante e cinza, de acordo com os requisitos do cliente. Nele é removida a camada de óxidos (formada pelos processos de recozimento), através da imersão do aço num banho ácido, e é promovida a formação de uma camada fina de óxido com resistência à corrosão sobre a superfície metálica do perfil de aço.

O estudo teve como objetivo otimizar o processo de decapagem química, utilizando a metodologia DMAIC (Definir, Medir, Analisar, Implementar e Controlar), de modo a minimizar o custo da operação de decapagem e alcançar as seguintes metas: um nível sigma de 3; e um indicador OEE (*Overall Equipment Effectiveness*) de 85%.

Embora nenhuma destas metas tenha sido alcançada, este trabalho contribuiu para um melhoramento substancial do indicador de OEE em cerca de +45% (passou de 55% para 80%), aumentar o nível sigma em cerca de +69% (passou de 1,74 para 2,95), bem como uma redução de cerca de 6,6% do custo por tonelada de aço decapado (passou de 20,61 €/ton para 19,24 €/ton).

Cada uma das fases da metodologia DMAIC foi desenvolvida ao longo do presente projeto, excetuando a fase Controlar. Na etapa Definir descreveu-se a decapagem química e identificou-se os vários problemas neste setor, como o elevado consumo de ácidos, a produção de resíduos e os tempos de decapagem excessivos.

O trabalho desenvolvido permitiu também aprofundar a compreensão do setor da decapagem química na Böllinghaus Steel S.A., sendo de salientar o seguinte:

- Relativamente aos banhos da decapagem, concluiu-se que um elevado potencial redox (redução-oxidação) não se traduz num consumo do ácido fluorídrico (HF);
- Um aumento da concentração de ácido sulfúrico no banho ácido leva a um aumento do pH e do potencial redox;
- Aquando da adição de ácido fluorídrico (50L) imediatamente a seguir à adição de ácido sulfúrico (50L) ao banho não se observa um aumento da concentração de ácido fluorídrico no banho;

- Observa-se uma acentuação do consumo de peróxido de hidrogénio quando a quantidade de aço decapado de qualidade 1.4305 (AISI 303) é superior a 7% da quantidade total de aço tratado por dia no setor de decapagem química;

- As quantidades de ferro aumentam ao longo da vida do banho ácido, mas se ocorrer diluições significativas a quantidade de ferro II diminui. Uma diluição significativa não beneficia a longevidade do banho mas ajuda na reatividade deste.

Foram também realizadas microscopias óticas de amostras do aço ao longo do tempo da decapagem. Conclui-se que após os processos de decapagem e lavagem a jato, a área da superfície oxidada é em média inferior a 3% da superfície total. Concluiu-se também que os aços inoxidáveis que demoram menos tempo a decapar são os de qualidade 1.4307 e 1.4305, com um tempo médio de decapagem de 90 minutos. O aço mais difícil de decapar é o aço martensítico (aço de qualidade 1.4542), com um tempo médio de decapagem de 120 minutos.

É de salientar que ao longo de todo o estágio na Böllinghaus Steel foram aplicados os “princípios subjacentes” à etapa Melhorar do método DMAIC nas mais diversas tarefas ou ações desenvolvidas, nomeadamente: o plano ótimo de trabalhos, a redução dos tempos de decapagem, o suporte de carregamento dos cavaletes, a ventilação na área envolvente, e por fim, a alteração da composição do Surtec NB.

Foram também identificadas oportunidades de melhoria adicionais do setor de decapagem química da Böllinghaus Steel como, por exemplo, o sistema de remoção de lamas, o sistema de recirculação e recuperação dos ácidos, a adição automática de ácido e o sistema de agitação do banho.

Palavras-chave: Decapagem química, Aço inoxidável, Böllinghaus Steel, DMAIC, Seis sigma.

Abstract

This work is focused on the stainless steel profiles pickling sector at Böllinghaus Steel. The pickling process is one of the main finishing techniques used for stainless steel profiles. The main goal is to obtain stainless steel profiles with a shiny surface. During this process the layers of oxides at the surface, originated in the process stainless steel annealing stage, are removed by an immersion of the stainless steel profiles in an bath of acid. This treatment promotes as well the formation of a thin layer of oxide that enhances the resistance to the corrosion of the metal surface of the steel profile.

The goal of this study was to optimize the pickling process by application of the DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve and Control) framework for improving processes. The main targets are the minimization of the pickling operating costs and to attain the following indicators levels: a sigma level of 3; an OEE (Overall Equipment Effectiveness) of 85%.

Although none of these levels was attained, this work has contributed to a substantial improvement of about +45% in the OEE indicator (from 55% to 80%), to increase the sigma level by approximately +69% with respect to the initial level (it increased from 1.74 to 2.95), as well to a reduction of about 6.6% in the cost per ton of stainless steel treated (it decreased from 20.61 € to 19.24 € per ton).

Each DMAIC improvement step was carried out in this work, with the exception of the Control step. In the Define step, the pickling operation was described and several operational limitations and difficulties were identified. These include the quite high consumption of acid, the production of residues, and the too long times required to complete the pickling.

This work has contributed as well for a deeper understanding of the operation of the pickling sector at Böllinghaus Steel. It is worth pointing out the following conclusions:

- With respect to the pickling acid baths, a high redox (reduction-oxidation) potential does not cause a consumption of hydrofluoric acid;
- An increase of the sulfuric acid concentration in the bath leads to an increase of the pH and of the redox potential;
- When adding hydrofluoric acid (50L) to the bath right after the addition of sulfuric acid (50L), there is no an increase in the concentration of hydrofluoric acid in the bath;

- An increase in the consumption of hydrogen peroxide is noticed whenever the percentage of amount of steel with EN grade number 1.4305 (AISI grade number 303) is higher than 7% of the daily total amount of steel that undergoes the pickling treatment;

- The quantity of iron increases over the acid bath time life, but if important dilutions are made the amount of iron II decreases. A significant dilution does not increase the time life of the batch but does, however, improve its reactivity.

The observation of the evolution (during the pickling) of the reduction of the oxides layers in the stainless steel surface was monitored through optical microscopy of steel samples. One concludes that:

- The area of the surface that remains oxidized after the pickling and washing with a jet of water is in average less than 3% of the total surface area;

- The stainless steels that require shorter pickling times are those of grades 1.4307 and 1.4305, with an average pickling time of 90 minutes;

- The martensitic steel (stainless steel of grade 1.4542) is the most difficult to treat, and it requires longer pickling times (120 minutes in average).

It is worth mentioning that along the work activities carried out at Böllinghaus Steel, the underlying principles of the Improve step of DMAIC were applied to all tasks or actions made, regarding namely: the optimal plan of work, the pickling time reduction, the racks loading support, the ventilation of the pickling sector, and the change of the bath Surtec NB composition.

Opportunities to further improve the pickling sector at Böllinghaus Steel were considered as well. These include, for instance, a system for sludge removal, a system for recirculation and recovery of acids, the automation and control of the acid addition, and a system for mixing the acid bath.

Keywords: Pickling, Stainless Steel, Böllinghaus Steel, DMAIC, Six Sigma.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	xii
ÍNDICE DE TABELAS	xvi
NOMENCLATURA E SIGLAS	xix
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Produção de perfis de aço na Böllinghaus Steel	2
1.2. Objetivos	4
1.3. Organização da dissertação.....	4
2. AÇO INOXIDÁVEL, APLICAÇÕES E PROCESSO DE DECAPAGEM	7
2.1. Aplicações.....	7
2.2. Tipos de aço inoxidável	7
2.2.1. Efeito dos elementos das ligas metálicas.....	8
2.2.2. Corrosão do aço inoxidável	9
2.2.3. Propriedades da camada de óxido	10
2.3. Decapagem.....	10
3. METODOLOGIA.....	17
3.1. A metodologia Seis Sigma.....	17
3.1.1. Fundamentos do Seis Sigma.....	17
3.1.2. Intervenientes do Seis Sigma.....	18
3.1.3. A metodologia do DMAIC	19
4. FASE DEFINIR.....	21
4.1. Definição da equipa	21
4.2. Definição do problema.....	21
4.3. Definição do plano de projeto.....	23
4.4. SIPOC	23
4.5. Descrição do setor da decapagem química	24
4.6. Requisitos críticos do processo de decapagem para a qualidade	28
5. FASE MEDIR	31

5.1.	Composições dos banhos e águas ácidas.....	31
5.2.	Parte experimental.....	32
5.2.1.	Análises químicas aos banhos ácidos.....	32
5.2.2.	Microscopia ótica.....	37
5.3.	Produção.....	38
5.3.1.	Diagrama de dependências.....	38
5.3.2.	Diagrama de Gantt.....	38
5.3.3.	Tempo de produção.....	39
5.3.4.	Capacidade de produção.....	40
5.3.5.	OEE - (<i>Overall Equipment Effectiveness</i>).....	42
5.4.	Nível Sigma.....	44
6.	FASE ANALISAR.....	45
6.1.	Diagrama de Ishikawa.....	45
6.2.	Apresentação e Discussão de Resultados.....	46
6.2.1.	Análises químicas.....	46
6.2.2.	Avaliação da camada de óxido através da microscopia ótica.....	54
7.	FASE MELHORAR.....	65
7.1.	<i>Brainstorming</i>	65
7.2.	Propostas de melhoria.....	66
7.2.1.	Plano ótimo de trabalhos.....	66
7.2.2.	Redução dos tempos de decapagem.....	67
7.2.3.	Carregamento de cavaletes.....	67
7.2.4.	Ventilação da área envolvente.....	68
7.2.5.	Melhoria da qualidade dos banhos ácidos.....	68
7.3.	Resultados.....	72
7.3.1.	Capacidade de produção.....	72
7.3.2.	Nível Sigma.....	72
7.3.3.	OEE.....	73
7.4.	FASE CONTROLAR.....	74
8.	CONCLUSÕES.....	75
8.1.	Perspetivas de trabalho futuro.....	76

9. BIBLIOGRAFIA77

ANEXOS79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Instalações da Böllinghaus Steel na Vieira de Leira.	2
Figura 1.2 - Perfis de aço inoxidável.	2
Figura 1.3 - Fluxograma do processo da Böllinghaus.	3
Figura 2.1- Representação do ataque do banho ácido ao aço em estado negro.	12
Figura 4.1 - Principais gastos financeiros do setor da decapagem no ano 2014.	22
Figura 4.2 - Diagrama de SIPOC do setor da decapagem.	24
Figura 4.3 - Processo de decapagem química na empresa Böllinghaus.	25
Figura 4.4 - Diagrama Spaghetti do setor da decapagem na empresa Böllinghaus.	26
Figura 5.1- Coloração ao longo da vida do banho (do início para o fim de vida).	31
Figura 5.2 - Relação entre a condutividade e a concentração do ácido sulfúrico.	34
Figura 5.3 - Relação entre a condutividade e a concentração do ácido fluorídrico.	34
Figura 5.4 - Titulação com permanganato de potássio.	35
Figura 5.5 - Titulação com tiosulfato de sódio 0,1N.	36
Figura 5.6 - Entradas do setor da decapagem.	38
Figura 5.7 - Saídas do setor da decapagem.	38
Figura 5.8 - Toneladas decapadas por dia relativamente ao banho 2-15.	41
Figura 5.9 - Toneladas decapadas por dia relativamente ao banho 3-15.	41
Figura 5.10 - Percentagens das quantidades das qualidades de aços decapados pelo banho 2-15.	41
Figura 5.11 - Percentagens das quantidades das qualidades de aços decapados pelo banho 3-15.	41
Figura 6.1 - Diagrama de Ishikawa.	45

Figura 6.2 - Representação da variação do potencial Redox e da concentração do ácido fluorídrico após uma de adição 100 litros de peróxido de hidrogénio.	47
Figura 6.3 - Representação da variação do potencial redox e da concentração do ácido fluorídrico após uma de adição 100 litros de peróxido de hidrogénio.	47
Figura 6.4 - Representação da variação do potencial Redox e da concentração do ácido sulfúrico após uma adição de 100 litros de peróxido de hidrogénio.	48
Figura 6.5 - Representação da variação do potencial Redox e do pH após uma adição 100 litros de peróxido de hidrogénio.	48
Figura 6.6 - Representação da variação de ácido fluorídrico e sulfúrico após uma adição de 100 litros de ácido sulfúrico	50
Figura 6.7 - Representação da variação de ácido fluorídrico e sulfúrico após uma adição de 100 litros de ácido fluorídrico.	51
Figura 6.8 - Representação da variação da concentração do ácido fluorídrico e da concentração do ácido sulfúrico após uma adição 50 L de cada.	51
Figura 6.9 - Representação das quantidades de ferro ao longo do tempo de vida do banho 4-15.	52
Figura 6.10 - Representação das quantidades de ferro ao longo do tempo de vida do banho 5-15.	52
Figura 6.11 - Densidade ao longo do tempo de vida do banho ácido.	54
Figura 6.12 - Imagem microscópica do aço 1.4404 proveniente de TA.	55
Figura 6.13 - Imagem microscópica do aço 1.4404 proveniente de TC (com contraste diferente).	55
Figura 6.14 - Imagem microscópica do aço 1.4404 com 30 minutos na decapagem.	56
Figura 6.15 - Imagem microscópica do aço 1.4404 com 30 minutos na decapagem com o tratamento realizado pelo programa LAS V4.6.	56
Figura 6.16 - Resultados obtidos através do programa LAS V4.6.	56

Figura 6.17 - Superfícies do aço 1.4404 produzido no Trem contínuo (canto esquerdo superior – estado negro; do centro esquerdo para direito – 30, 60, 90 e 120 minutos na decapagem; do canto inferior esquerdo para direito – 30, 60, 90 e 120 minutos na decapagem e jato).	56
Figura 6.18 - Microscopias ao tipo de aço 1.4404 produzido no trem contínuo, em que a cor verde corresponde aos óxidos presentes na superfície do aço. (canto esquerdo superior – estado negro; do centro esquerdo para direito – 30, 60, 90 e 120 minutos na decapagem; do canto inferior esquerdo para direito – 30, 60, 90 e 120 minutos na decapagem e jato).	57
Figura 6.19 - Microscopias ao tipo de aço 1.4404 produzido no trem aberto, em que a cor verde corresponde aos óxidos presentes na superfície do aço. (canto esquerdo superior – estado negro; do centro esquerdo para direito – 30, 60, 90 e 120 minutos na decapagem; do canto inferior esquerdo para direito – 30, 60, 90 e 120 minutos na decapagem e jato).	57
Figura 6.20 - Percentagens de remoção entre os diferentes tempos admitidos.....	58
Figura 6.21 - Percentagem da presença de óxidos na superfície do aço inoxidável ao longo do tempo da decapagem.....	58
Figura 6.22 - Percentagens de remoção entre os diferentes tempos admitidos.....	59
Figura 6.23 - Percentagem da presença de óxidos na superfície do aço inoxidável ao longo do tempo da decapagem e em seguida lavagem a jato de água.	59
Figura 6.24 - Percentagens de remoção entre os diferentes tempos admitidos.....	60
Figura 6.25 - Percentagem da presença de óxidos na superfície do aço inoxidável ao longo do tempo da decapagem.....	60
Figura 6.26 - Percentagens de remoção entre os diferentes tempos admitidos.....	61
Figura 6.27 - Percentagem da presença de óxidos na superfície do aço inoxidável ao longo do tempo da decapagem.....	61
Figura 6.28 - Aço 1.4305 produzido no Trem Contínuo e no Trem Aberto.....	62
Figura 6.29 - Aço 1.4542 produzido no Trem Contínuo e no Trem Aberto.....	62

Figura 6.30 - Comparação entre o aço 1.4307 proveniente de TA e de TA+TT.....	63
Figura 6.31 - Comparação entre o aço 1.4542 proveniente de TA e de TA+TT.....	63
Figura 7.1 - Matriz importância vs Custo.....	65
Figura 7.2 - Suporte para o carregamento dos cavaletes (Projeto e implementação dos 2 suportes na zona de carga).....	67
Figura 7.3 - Ventilação (Solução implementada).....	68
Figura 7.4 - Filtração (Scanacon, 2010).	69
Figura 7.5 - Esquema do processo de troca iónica.	70
Figura 0.1 - Diagrama de Gantt do turno A.....	87
Figura 0.3 - Diagrama de Gantt do turno B.....	87
Figura 0.2 - Diagrama de Gantt do turno C.....	87
Figura 0.4 - Diagrama de Gantt do turno D.....	88
Figura 0.5 - Sistema de filtração (imagem cedida pela Scanacon).....	89
Figura 0.6 - Cenários pessimistas vs cenário possível.....	91
Figura 0.7 - Toneladas decapadas por dia relativamente ao banho 5-15.....	92
Figura 0.8 - Toneladas decapadas por dia relativamente ao banho 4-15.....	92

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1 - Objetivos do projeto.....	4
Tabela 2.1 - Estudos de processos de decapagem ácida.	14
Tabela 2.2 - Estudo do comportamento do aço durante a decapagem.	15
Tabela 3.1 - Níveis de Sigma, DPMO e rendimento. (Lucas, 2002)	18
Tabela 3.2 - Terminologia correspondente aos colaboradores da equipa seis sigma (por ordem de responsabilidade).	18
Tabela 3.3 - Ferramentas da metodologia DMAIC.....	19
Tabela 5.1 - Análises químicas ao banho de decapagem.	32
Tabela 5.2 - Idade do banho vs quantidade de Ferro total	36
Tabela 5.3 - Toneladas e barras produzidas num mês por cada turno.	39
Tabela 5.4 - Tempos médios das principais operações do setor da decapagem.	40
Tabela 5.5 - Dias produtivos dos banhos, número de barras, peso e área superficial dos aços decapados.....	40
Tabela 5.6 – Custos de produção dos banhos em estudo (€).	42
Tabela 5.7 - Indicadores económicos nos banhos em estudo.	42
Tabela 5.8 - Dados relativos aos banhos 2-15 e 3-15 para o cálculo do OEE.	43
Tabela 5.9 - Resultados dos cálculos de OEE.....	43
Tabela 5.10 - Resultados do cálculo de DPMO (qualidades mais processadas) no banho 2-15.	44
Tabela 5.11 - Resultados do cálculo de DPMO (qualidades mais processadas) no banho 3-15.	44
Tabela 6.1 - Valores dos parâmetros principais da decapagem nos dias 25 e 26 de Maio de 2015.	49
Tabela 6.2 - Resultados semanais no banho 4-15.	53

Tabela 6.3 - Análise das quantidades de ácidos consumidos e seus respectivos custos.	54
Tabela 6.4 - Espessura da camada de óxidos (μm) em cada tipo de aço.....	55
Tabela 7.1 - Organização das tarefas ao longo de um turno (8 horas).	66
Tabela 7.2 - Tempos ótimos da decapagem para cada qualidade de aço.	67
Tabela 7.3 - Vantagens e Desvantagens dos sistemas de remoção dos sólidos.....	69
Tabela 7.4 - Vantagens e Desvantagens do processo de troca iónica.....	70
Tabela 7.5 - Indicadores económicos.	72
Tabela 7.6 - Resultados do cálculo de DPMO para o banho 4-15 e 5-15.	72
Tabela 7.7 - Resultados dos cálculos OEE para os banhos 4-15 e 5-15.....	73
Tabela 8.1 - Valores resultantes da implementação DMAIC no presente projeto.	75
Tabela 0.1 - Plano de Projeto.....	80
Tabela 0.2 - Análises às águas ácidas provenientes do processo de decapagem.....	81
Tabela 0.3 - Taxas de ocupação de todas as operações da empresa Böllinghaus.....	86
Tabela 0.4 - Média dos tempos das operações na decapagem relativos a cada turno.	89
Tabela 0.5 - Cálculo do Valor atual líquido para o sistema de filtração e de recuperação de ácidos.....	91
Tabela 0.6 - Média e desvio-padrão do banho 4-15 e 5-15.	92
Tabela 0.7 - Dias produtivos dos banhos, número de barras, peso e área superficial dos aços decapados.	92
Tabela 0.8 - Custos de produção dos banhos 4-15 e 5-15.	92
Tabela 0.9 - Dados relativos aos banhos 4-15 e 5-15 para o cálculo do OEE.....	93

NOMENCLATURA E SIGLAS

Nomenclatura

R – Constante dos gases

F – Constante de Faraday

n – Número de elétrons envolvidos

Q – Coeficiente de reação

E – Elétrodo

E₀ – Elétrodo de referência

Qualidades dos aços inoxidáveis:

Normas	
AISI	EN
304 L	1.4307
303	1.4305
316 L	1.4404
316 Ti	1.4571
630	1.4542
310	1.4841

Sligas

PME – Pequena e Média Empresa

OEE - *Overall Equipment Effectiveness*

SIPOC – Supplier, Input, Process, Output, Customer

CTQ – Critico para a qualidade

CDL – Camada Cr-depleted

DMAIC – Definir, Medir, Analisar, Melhorar, Controlar

TT – Tratamento Térmico

TA – Trem Aberto

TC – Trem Contínuo

Surtec A – Peróxido de hidrogénio

Surtec NB – Ácido fluorídrico

PB – Payback (Retorno de investimento)

1. INTRODUÇÃO

O mundo da indústria tem sido alvo de vários impactos económicos. No entanto, neste presente ano é provável um crescimento lento da economia de forma a aliviar os mercados financeiros (Osório, 2014). As empresas utilizam métodos para uma melhoria contínua no processo de produção de modo a solidificar uma posição no mercado. Um método organizado e sistemático capaz de melhorar o processo produtivo é o Seis Sigma, que “é um método altamente disciplinado de recolha e tratamento de dados, que faz uso de ferramentas estatísticas, e que requer um forte envolvimento da gestão de topo e uma hierarquia de colaboradores devidamente treinados” (Ferreira et al., 1998).

Na empresa Böllinghaus Steel (Figura 1.1), o Seis Sigma tem vindo a ser implementado nos últimos anos. A empresa Böllinghaus Steel iniciou a sua atividade em 1889, em Remscheid, perto de Düsseldorf, na Alemanha, e foi fundada por Hermann Böllinghaus e Johann Ladwig Härtel, dedicando-se à produção de vários tipos de aço. No início dos anos noventa iniciou a produção de aço inoxidável.

Em 1996, a Böllinghaus, presidida por Hartwig Härtel, adquire a antiga fábrica de aços Tomé Feteira, em Vieira de Leiria, passando a haver duas unidades de produção, uma em Portugal e outra na Alemanha. Em 2001, a unidade de produção Alemã encerra mas a sede da empresa continua neste país, estando localizada em Hilden desde 2013.

Atualmente, a empresa Böllinghaus conta com uma experiência de 125 anos na produção de aço, com uma capacidade anual de milhares de toneladas.

Em 2013, foi atingido um volume de negócios de aproximadamente de 34,6 milhões de euros e os seus principais mercados alvo são a Europa e a América do Norte. Nesse ano, a empresa Böllinghaus Steel recebeu o estatuto de PME Excelência e no ano seguinte foi distinguida como a PME Líder.

A Böllinghaus Steel tem como objetivo principal aumentar a sua capacidade produtiva. Em 2014, iniciou-se um projeto de expansão com a introdução de um novo sistema de embalagem, uma nova máquina de desempenho e a expansão dos pavilhões industriais.

A gama de produtos da Böllinghaus Steel (Figura 1.2) acompanha as novas tendências nos mercados e promove o desenvolvimento de novos produtos. Atualmente, os produtos que estão no mercado são laminados a quente ou estirados a frio podendo ter diferentes perfis, tais

Otimização do processo de decapagem química numa empresa de produção de perfis de aço

como: retangulares, quadrados, hexagonais e especiais. Os perfis especiais são desenvolvidos à medida, de acordo com as exigências do cliente.



Figura 1.1 - Instalações da Böllinghaus Steel na Vieira de Leira.

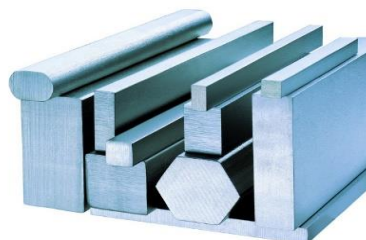


Figura 1.2 - Perfis de aço inoxidável.

A produção na Böllinghaus é sujeita a controlos rigorosos de qualidade de modo a garantir que a empresa Böllinghaus garanta o seu sucesso a nível mundial e a total satisfação dos seus clientes.

1.1. Produção de perfis de aço na Böllinghaus Steel

O estudo foi desenvolvido numa empresa de produção de perfis de aço, a Böllinghaus Steel, e teve como foque no setor da decapagem química. A empresa Böllinghaus Steel tem uma variabilidade elevada de gamas de aço, produzindo mais de 700 tipos de perfis. Devido à sua capacidade de resposta às exigências dos clientes e à crescente procura dos seus produtos, a empresa encontra-se em velocidade cruzeiro e tem como metas a finalização do seu projeto “Böllinghaus 2020”, para o qual está previsto investimentos na melhoria do processo produtivo, das condições de trabalho e ambientais.

O processo da decapagem química tem um papel essencial no processo produtivo da empresa (ver Figura 1.3), sendo que este é um dos procedimentos principais do processo de acabamento. Permite transformar o aço em estado negro para aço brilhante e cinza de acordo com os requisitos do cliente.

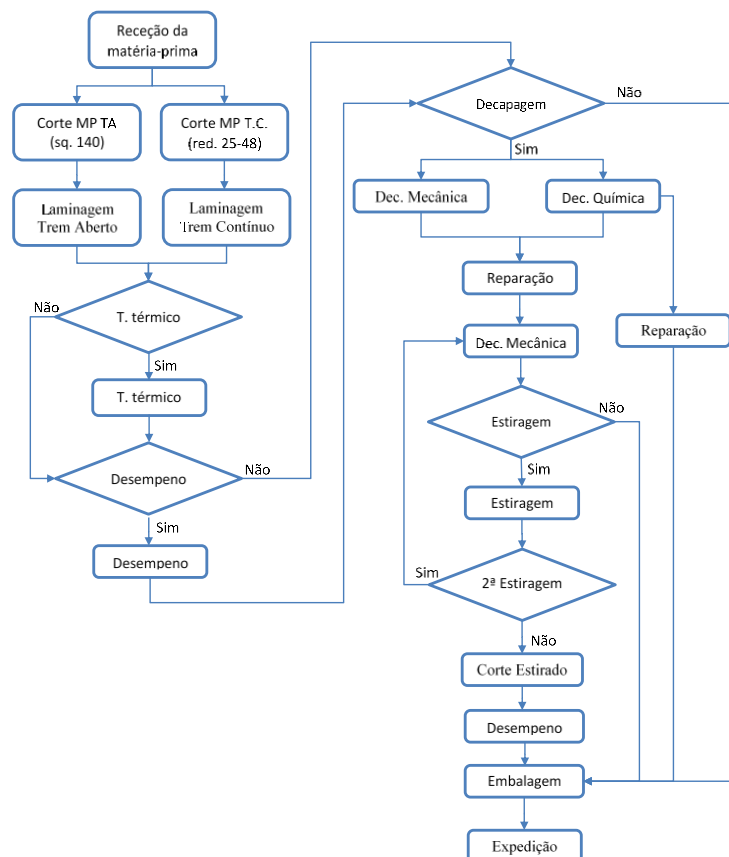


Figura 1.3 - Fluxograma do processo da Böllinghaus.

Para otimizar o processo da decapagem decidiu-se implementar um projeto seis sigma. Atualmente o processo da decapagem tem a dificuldade de permanecer permanentemente controlado, o que provoca uma necessidade de aumento do tempo de decapagem. No ano 2014, na empresa Böllinghaus foram embaladas cerca de 12 131 toneladas, sendo que pelo setor da decapagem passaram cerca de 11 472 toneladas, ou seja, cerca de 95% do aço embalado passa pela decapagem. É de salientar que a dependência do tempo de produção do produto relativamente ao setor da decapagem é elevada. Neste estudo, considerou-se que é fundamental controlar permanentemente o setor da decapagem e que todos os desvios das gamas ideais dos parâmetros a controlar serão, por definição, os defeitos apresentados pelo setor da decapagem.

1.2. Objetivos

A decapagem química das superfícies metálicas visa a remoção da camada de óxidos e impurezas inorgânicas. A causa para o aparecimento de uma camada de óxidos são as altas temperaturas em etapas de fabricação, como por exemplo, no processo de laminagem a quente e nos processos de tratamento térmico. Assim, para a remoção dessa camada é necessário recorrer à decapagem por imersão em banhos ácidos. A decapagem química tem de ser controlada através da monitorização de alguns parâmetros, tais como o potencial redox, a concentração de ácido sulfúrico, a concentração de ácido fluorídrico e as quantidades de ferro II e III. É de salientar que o banho ácido só decapa eficazmente em certas gamas de valores destes parâmetros.

O objetivo deste projeto é otimizar o processo de decapagem a diferentes níveis, tais como: controlar e reduzir as quantidades de ácidos utilizados, aumentar o tempo de vida de um banho ácido, diminuir os tempos de decapagem, diminuir os custos associados, diminuir a quantidade de águas e lamas ácidas resultantes. A realização destes objetivos irá permitir uma redução dos custos associados ao setor, uma redução do número de defeitos por milhão (DPMO) de amostras e um aumento do nível sigma do processo relativamente a tempos excessivos e segundas decapagens. Na Tabela 1.1 são apresentadas as metas que se pretendem alcançar com o melhoramento do processo de decapagem.

Tabela 1.1 - Objetivos do projeto.

Objetivo	Inicial	Meta
Aumento do OEE	55%	85%
Redução de DPMO	398 929	66 807
Aumento do nível sigma	1,74	3
Redução do custo por tonelada	20,61 €/ton	18 €/ton

1.3. Organização da dissertação

A presente dissertação contempla sete capítulos para além deste primeiro capítulo de introdução.

No Capítulo 2 são apresentados os principais tipos de aço inoxidável (secção 2.2), as suas características e exemplos da sua aplicação. É apresentado o problema de corrosão a que está sujeito o aço inoxidável e são descritos os processos de decapagem que podem ser utilizados (secção 2.3), nomeadamente o da decapagem química.

Os fundamentos do Seis Sigma e seus intervenientes, e a metodologia DMAIC no âmbito do melhoramento do processo e qualidade do produto final são descritos de forma sumária no Capítulo 3.

Do quarto ao sétimo capítulo descrevem-se as quatro primeiras fases da metodologia DMAIC (Definir, Medir, Analisar, Implementar e Controlar) relativamente ao trabalho desenvolvido, correspondendo ordenadamente cada capítulo a cada uma dessas fases exceto a fase Controlar.

No Capítulo 4 define-se a equipa, o problema do processo de decapagem e o plano de projeto. Na secção 4.4 é apresentado o esquema SIPOC que ajuda na compreensão das entradas e saídas do processo. A descrição do processo de decapagem é apresentado na secção 4.5 e na secção 4.6 é apresentado o esquema CTQ para compreender quais as métricas e metas a atingir para a qualidade dos banhos da decapagem.

A fase Medir é reportada no Capítulo 5 que contempla a descrição das composições dos banhos e águas ácidas (secção 5.1), da parte experimental com as análises químicas aos banhos ácidos e as análises de microscopia ótica ao aço ao longo do tempo da decapagem (secção 5.2), da produção (secção 5.3) que contempla cálculos e diagramas necessários para compreender o setor, e do Nível Sigma dos banhos ácidos (secção 5.4).

No Capítulo 6 descreve-se a fase Analisar, em que é apresentado o diagrama de Ishikawa (secção 6.1) e são discutidos os resultados recolhidos a partir das análises químicas e das microscopias óticas (secção 6.2).

A fase Melhorar é descrita no Capítulo 7, em que se apresenta os resultados de uma sessão de Brainstorming (secção 7.1) e as propostas de melhorias para o processo de decapagem (secção 7.2). Nesta fase são apresentados os resultados (secção 7.3) relativos aos novos banhos ácidos que contemplam algumas das melhorias propostas. Também neste capítulo, na secção 7.4, enumera-se os parâmetros de controlo que futuramente devem ser controlados após a implementação das propostas de melhoria no processo de decapagem.

2. AÇO INOXIDÁVEL, APLICAÇÕES E PROCESSO DE DECAPAGEM

O aço inoxidável é um material metálico composto por elementos de liga, ou seja, elementos químicos que formam ligas metálicas, entre as quais ligas de ferro (Fe), de carbono (C), e de cromo (Cr) com um mínimo de 13%. Através da adição de elementos de liga obtém-se melhorias de algumas propriedades, tais como a diminuição ou aumento do ponto de fusão, o aumento da dureza, o aumento da resistência mecânica e entre outras (Petrobrás, 2011).

2.1. Aplicações

O aço inoxidável tem uma panóplia de aplicações. No entanto, existem aços inoxidáveis direcionados para aplicações muito específicas. A título de exemplo, na indústria farmacêutica são necessários aços muito resistentes à corrosão por forma a não contaminar o produto em contacto. As principais aplicações de aço inoxidável são, entre outras:

- Instrumentos cirúrgicos, devido à facilidade de limpeza e de esterilização.
- Indústria química, petroquímica, farmacêutica, devido às elevadas resistências a altas temperaturas e à corrosão.
- Indústria automóvel, construção, eletrodomésticos.

2.2. Tipos de aço inoxidável

Os tipos de aço inoxidável existentes no mercado estão divididos em cinco grupos principais: austeníticos, martensíticos, ferríticos, duplex e os endurecidos por precipitação.

Aço austenítico

O aço austenítico é um aço não magnético com uma estrutura cúbica de corpo centrado. É basicamente composto por ferro, cromo e níquel. É possível adicionar elementos de liga como o molibdénio e reduzir o teor de carbono, melhorando a sua resistência à corrosão. As principais vantagens deste tipo de aço são as boas propriedades mecânicas, a boa soldabilidade, ótima ductilidade e tenacidade e a resistência à corrosão.

Aço martensítico

O aço martensítico tem uma estrutura cristalina tetragonal de corpo centrado. É composto principalmente por ferro, cromo e carbono. As principais vantagens deste tipo de

aço são a elevada dureza após o tratamento térmico, a facilidade em trabalhar a quente e a frio, e a boa resistência à corrosão. No entanto, apresenta algumas desvantagens, tais como a ductilidade e tenacidade baixas, sendo que um aumento do teor de carbono baixa a sua resistência à corrosão.

Aço ferrítico

O aço ferrítico é um aço magnético com uma estrutura cúbica de corpo centrado, basicamente composto por ferro e cromo. As principais vantagens deste tipo de aço são a resistência à fragilização por hidrogénio, a resistência à corrosão atmosférica e o seu baixo custo. No entanto tem algumas desvantagens, tais como a baixa ductilidade, restrições na soldabilidade, e a sua estrutura poder enfraquecer a resistência à corrosão.

Aço duplex

O aço duplex é um tipo de aço com uma estrutura bifásica de características austenítica e ferrítica, e com um magnetismo fraco. É composto principalmente por ferro e cromo, com pequenas quantidades de níquel, cobre e molibdénio. A combinação de níquel e cromo proporciona uma boa resistência à fratura comparativamente ao aço austenítico. Comparando com o aço ferrítico, este tem uma melhor tenacidade e ductilidade. No entanto, apresenta desvantagens, como o facto de necessitar um elevado controle de parâmetros para a soldabilidade de modo a evitar possíveis desequilíbrios entre as fases nele existentes.

Aço endurecido por precipitação

Por fim, o aço endurecido por precipitação é obtido por tratamento de envelhecimento, que envolve a formação de fases intermetálicas. Estes aços são compostos principalmente por ferro, cromo e níquel. As principais vantagens deste tipo de aço são: a boa ductilidade e tenacidade; a facilidade de soldabilidade relativamente aos aços martensíticos. No entanto, tem algumas desvantagens, tais como uma baixa resistência à corrosão e uma suscetibilidade à fragilização por hidrogénio (ArcelorMittal, 2010).

2.2.1. Efeito dos elementos das ligas metálicas

O cromo é o elemento fundamental da constituição do aço inoxidável. O papel deste elemento é originar uma camada passiva sobre a superfície do aço de forma a fornecer uma elevada resistência à corrosão, característica dos aços inoxidáveis. De facto, no meio atmosférico natural, com baixos índices de contaminação, observa-se uma diminuição da velocidade de oxidação destas ligas à medida que se aumenta a quantidade de cromo. A percentagem mínima de cromo é um critério utilizado que sustenta que a liga resiste à corrosão atmosférica. A

principal desvantagem da utilização deste elemento no aço é a fragilidade do material, o que prejudica o manuseamento ao longo do processo, e também o seu elevado custo. São também utilizadas outros elementos tais como o níquel, o molibdénio e o cobre.

O níquel tem a função de aumentar a resistência à corrosão geral do material e a resistência mecânica. No entanto, um aumento de níquel na composição diminui a velocidade de formação da estrutura do aço. O molibdénio melhora a resistência à corrosão do material, a resistência a altas temperaturas e atua como estabilizador do aço ferrítico. O cobre aumenta a resistência à corrosão, a resistência a altas temperaturas e a resistência à fadiga. No entanto, reduz a ductilidade e a tenacidade. O carbono melhora as propriedades mecânicas, tais como a dureza. Todavia, dificulta a soldadura devido à dureza do material (Petrobrás, 2011).

2.2.2. Corrosão do aço inoxidável

Quando o aço inoxidável é sujeito a recozimentos surgem na sua superfície camadas de óxidos que provocam a destruição da aparência metálica pretendida. Estas camadas são constituídas principalmente por óxidos de ferro e encontram-se nas seguintes formas: a wustite (FeO), a magnetite (Fe₃O₄, cor preta) e a hematite (Fe₂O₃, cor vermelha).

Os diferentes tipos de aços são denominados de aços inoxidáveis ou de antiferrugem, pois a formação de ferrugem, ou seja a formação da camada de óxidos, é impedida sob as condições normais do meio, por exemplo, na presença de humidade e oxigénio. Na maioria dos aços inoxidáveis, após sofrerem tratamentos térmicos e químicos, formam-se camadas de óxidos de crómio (camada passiva) sob as superfícies dos materiais, e que conferem a propriedade de resistir à corrosão (Filho, 1997).

No aço inoxidável, a presença de um mínimo de 13% de crómio na sua composição confere resistência à corrosão (Ferreira, 2015). Esta propriedade deve-se à formação da camada passiva originada pela reação química entre superfície metálica e a água, uma vez que o crómio tem uma elevada afinidade química ao oxigénio presente na água.

No entanto, em meios redutores a resistência à corrosão é débil, pois a camada passiva é formada por óxidos que não apresentam características típicas, como estabilidade, inércia, homogeneidade, espessura fina, porosidade e impermeabilidade.

2.2.3. Propriedades da camada de óxido

O processo de fabrico de aço inoxidável influencia a composição química, espessura e estrutura da camada de óxido. Os aços laminados a frio contêm uma camada de óxido inferior a 1mm. No entanto, os aços laminados a quente contêm uma camada de óxido homogénea e superior a 1 μ m. Os óxidos da laminação a quente formam-se durante os processos de laminação e recozimento. Por sua vez, os óxidos da laminação a frio formam-se apenas no processo de recozimento.

A gama de espessuras da camada de óxido para os aços austeníticos é de 10 a 205 μ m, como é referenciado por Tossey (2011). Por exemplo, segundo Kerr (2009), o aço 1.4404 tem uma gama de espessuras de 10 a 60 μ m. Relativamente aos aços martensíticos, segundo Hidaka, et al. (2001), a gama de espessuras da camada de óxido é de 15 a 50 μ m.

O aparecimento dos diferentes tipos de óxidos no aço depende da cinética de corrosão e também da termodinâmica, de acordo com o esquema de Ellingham-Richardson (Casals, 2010). Os óxidos mais estáveis têm maiores valores negativos da energia livre de Gibbs, e os mais comuns que se formam acima dos 1070°C são: SiO₂, MnO, Cr₂O₃, FeO e Fe₂O₃.

2.3. Decapagem

O objetivo do processo da decapagem do aço inoxidável é obter uma superfície metálica limpa após a remoção da camada de óxido e posteriormente promover a formação de uma camada de óxido fina (camada passiva) sobre a superfície metálica com resistência à corrosão (Valentino et al., 2001).

A decapagem pode ser um processo mecânico, químico e eletrolítico. Envolve um conjunto de processos mecânicos, químicos e/ou eletrolíticos realizados sobre superfícies metálicas que visa à remoção de oxidações indesejadas e outras impurezas, tais como:

-*Decapagem mecânica* que se baseia na conversão de energia cinética das partículas em energia de impacto. Ou seja, as partículas são lançadas a alta pressão de modo a que as superfícies metálicas sejam atingidas com intensidade e que as mesmas fiquem ilesas de defeitos e óxidos;

-*Decapagem química* que se divide em três grupos principais: imersão ácida, imersão salina e gel decapante. Independentemente do tipo de decapagem química o efeito é remover a camada de óxido através da interação química;

-*Decapagem eletrolítica* que associa o banho ácido e a aplicação de uma corrente contínua controlada para ocorrer uma transferência de eletrões entre os materiais com uma diferença de potencial elétrico de modo a remover a camada de óxidos (Filho, 1997).

Depois do processo de decapagem, o produto final terá uma camada de óxidos de crómio homogénea e estável (camada passiva), característica dos aços inoxidáveis.

De seguida, é descrita mais pormenorizadamente a decapagem química (imersão ácida).

Decapagem química

A decapagem química é um processo químico aplicado a superfícies metálicas, mais direcionado para ferro e aço, que pode conter ligas de cobre, níquel, entre outros. Envolve normalmente um tratamento químico aplicado às superfícies após a transformação da matéria-prima que ajusta o material para o tamanho e a geometria pretendida. Os processos de transformação onde é recozido o aço, como a laminação a quente ou o tratamento térmico, promovem a formação de uma camada de óxido na superfície do material.

O método mais utilizado industrialmente são os banhos ácidos em que é realizada a imersão do material. Os banhos são principalmente uma combinação de oxidantes e ácidos redutores. Os oxidantes promovem a reconstituição da camada passiva e os ácidos redutores removem os óxidos da superfície do material. Estes banhos são diluídos e podem conter agentes de oxidação e estabilizadores, que ajudam no processo de decapagem.

A decapagem do aço inoxidável através do processo químico é descrito por reações eletroquímicas. Estas ocorrem na camada de óxidos na superfície do metal, na qual se pode observar três camadas: a wustite junto à base do metal e constituída por FeO; a magnetite, que é a camada intermédia e é constituída por Fe₃O₄; e a camada externa a hematite, constituída por Fe₂O₃. No decorrer da formação destes óxidos, a camada de wustite sofre um arrefecimento rápido que leva a alterações físicas, uma vez que a camada de wustite é parcialmente decomposta em magnetite.

Quando o material metálico é imerso no banho ácido, o ácido penetra através dos microporos das camadas de hematite e magnetite (camadas ricas em óxidos de ferro), por forma a atacar a camada de wustite, tal como está ilustrado na Figura 2.1.

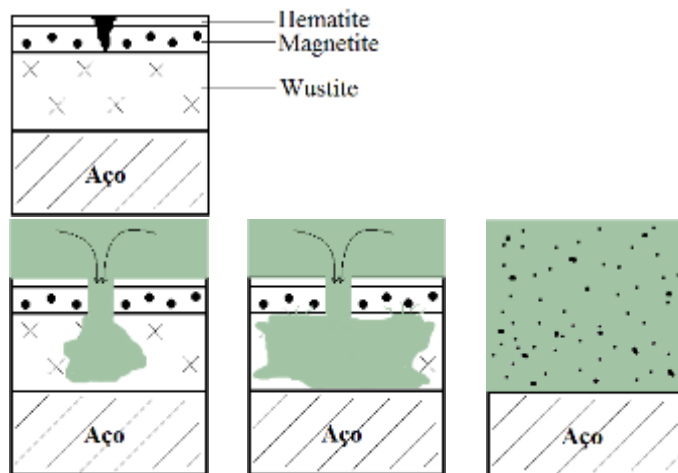


Figura 2.1- Representação do ataque do banho ácido ao aço em estado negro.

O ataque provocado pelo ácido tem um efeito rápido. Essa rapidez deve-se à formação de células eletroquímicas, em que os óxidos atuam como ânodo, o metal base atua como cátodo e o ácido atua como condutor iônico (Ferreira, 2015). A diferença de potencial dependerá da velocidade a que o ácido penetra nos microporos. Ao longo do ataque ocorre a formação de hidrogénio que coopera no despreendimento dos óxidos. Contudo, a maior percentagem de hidrogénio formado transforma-se na sua forma molecular. A restante parte difunde-se sob a forma de hidrogénio atómico no aço, o que provoca uma perda de propriedades mecânicas do aço, designada de fragilização por hidrogénio (Henkel, 1998).

Durante o tratamento térmico, que tem como função principal aumentar as resistências mecânicas dos aços inoxidáveis, o aço inoxidável forma mais uma camada, designada de camada Cr-depleted (CDL). Esta camada contém um teor mínimo de crómio relativamente ao metal base, sendo que é facilmente atacado pelo ácido. As reações eletroquímicas que ocorrem eliminam a camada de óxidos realizando também uma dissolução da camada Cr-depleted (Henkel, 1998). As reações eletroquímicas dependem dos ácidos utilizados nos banhos ácidos. Os mais utilizados industrialmente são: ácido nítrico, ácido sulfúrico, ácido fluorídrico. A proporção dos diferentes ácidos adicionados influencia o desempenho do processo de decapagem, uma vez que existem ácidos redutores que removem os óxidos da superfície, enquanto que os ácidos oxidantes reconstituem a camada passiva.

Uma vantagem do processo de decapagem com um banho ácido é a facilidade em decapar materiais com múltiplas geometrias. Este processo não altera mecanicamente o material

e permite ter o mesmo processo produtivo para os diferentes materiais. No entanto, restringe o tamanho do material devido ao tamanho fixo dos reservatórios da decapagem e requer uma consciencialização dos colaboradores relativamente à segurança e meio ambiente (ArcelorMittal, 2010).

2.3.1.1. Tipos de banhos ácidos

Nesta subsecção são referidos os principais trabalhos desenvolvidos nos últimos anos sobre o processo de decapagem química do aço inoxidável, com um foque especial nos tipos de banhos ácidos para aços austeníticos, bem como nos correspondentes parâmetros de controlo.

Segundo Bianchi (2000), os processos industriais de decapagem do aço inoxidável com a utilização de ácido nítrico estão a cair em desuso. Este processo envolve a libertação de vapores de óxidos de azoto (NOx) e por outro lado, quando os materiais metálicos seguem para a lavagem com água, a mesma fica poluída, com altas concentrações de nitratos. Portanto, a sua eliminação é fundamental e mais recentemente, tem sido proposto outro banho ácido.

De acordo com o estudo realizado por Angel et al. (1997), a adição de um agente de oxidação continuamente, tal como o peróxido de hidrogénio, tem como finalidade manter o potencial de oxidação do banho ácido porque este assegura a presença do Fe^{3+} . Uma desvantagem apresentada para a utilização de peróxido de hidrogénio é o facto de ocorrer perdas, uma vez que a maior quantidade deste composto reage com o Fe^{2+} . Também reage com outros iões metálicos presentes no banho (como o Fe^{3+}).

Opcionalmente também é possível adicionar estabilizadores de peróxido de hidrogénio de forma a impedir ou reduzir o processo de decomposição do composto, tais como o ácido fosfórico e o ácido salicílico. Mas, o processo de decapagem química mais adequado envolve a adição de fenacetina com uma quantidade de 5/20 ppm no banho de decapagem (Bianchi, 2000)

Giordani et al. (2012) avaliaram a possibilidade de substituir o ácido fluorídrico por ácidos com iões de fluoreto, com o intuito de diminuir os impactos ambientais que o ácido fluorídrico livre representa para o meio ambiente. Este estudo foi realizado em diferentes tipos de aço inoxidável incluindo o de tipo austenítico em foque no presente trabalho.

Relativamente ao uso de iões de cloreto nos processos de decapagem, em Negri et al. (2004) é reportado que a concentração destes iões pode ser um parâmetro crítico no processo

Otimização do processo de decapagem química numa empresa de produção de perfis de aço

da decapagem, uma vez que acima de 10g/l ocorre o aumento da velocidade, mas ao mesmo tempo ocorre um ataque prejudicial ao aço.

Um resumo dos objetivos, condições de operação e respetivas conclusões são reportados em patentes sobre processos de decapagem ácida é apresentado na Tabela 2.1. Nela está indicada a respetiva concentração dos compostos presentes nos banhos e as tecnologias utilizadas.

Tabela 2.1 - Estudos de processos de decapagem ácida.

Estudo	Tecnologias	Condições de operação	Conclusões	Referências
Estudo do método da decapagem ácida de aço, em que a solução circula continuamente e a adição de peróxido de hidrogénio é fornecido continuamente	Controlo do Potencial Redox na extremidade inversa da entrada da solução	Constituição do banho: ácido fluorídrico (1,5 a 3,5 moles/litro), ácido sulfúrico (1 a 3 moles/litro), peróxido de hidrogénio, água, Fe ³⁺ , Fe ²⁺ ; Temperatura: 35 a 60°C; Velocidade: 0,5 a 50 horas ⁻¹ ; Potencial redox: 300 a 500 mV	Adição contínua de peróxido de hidrogénio: 0,3 a 0,5 kg de H ₂ O ₂ por kg de Fe ²⁺ a ser oxidado na solução da decapagem. A circulação contínua da solução permite uma alta velocidade da decapagem com um baixo consumo de peróxido de hidrogénio.	(Angel et al., 1997)
Estudo da decapagem de aço inoxidável sem uso de ácido nítrico	Variação do fluxo de ar; Controlo do potencial Redox	Constituição do banho: Fe ³⁺ (>15 g/l), ácido sulfúrico (> 150 g/l), ácido fluorídrico (> 40g/l), peróxido de hidrogénio (2 a 5g/l), aditivos (1g/l de inibidores de ataque ácido); Temperatura: 30 a 70°C; pH: <1,5; Fluxo de ar:> 3m ³ /h por m ³ banho; Potencial redox: 250 a 350 mV	Controlo do potencial redox ao longo do ciclo da decapagem e injeção de ar em contínuo é a solução ideal e económica. O ácido sulfúrico e fluorídrico adicionado continuamente de modo a garantir o pH. Este método remove o problema de poluição do processo.	(Bianchi, 2000)
Estudo da substituição do ácido fluorídrico por ácidos com iões de fluoreto dos grupos 4, 13 e 14 da tabela periódica.	Variação das concentrações dos compostos presentes no banho ácido consoante os diferentes tipos de aço inoxidável	Constituição do banho: ácidos fortes (10 a 200g/l), ácidos com iões de fluoreto (50 a 500 mmoles/l), Fe ³⁺ (10 a 60 g/l), agente estabilizador do peróxido de hidrogénio (opcional), peróxido de hidrogénio (4 a 30 g/l), iões cloreto ou ácido clorídrico (0,1 a 10 g/l); Temperatura: 15 a 40°C; Potencial Redox: >300mV	Exemplificando para o aço austenítico: o tempo da decapagem diminui com uma concentração de 20 g/l de ácido fluorídrico e de 17 a 34 g/l de H ₂ SiF ₆ (hexafluorossilícico), alcançando um tempo mínimo de 35 minutos. A adição de iões cloreto (2 g/l) acelera o processo, reduzindo o tempo mínimo.	(Giordani et al., 2012)
Estudo dos iões cloreto e dos restantes compostos no processo de decapagem	Variação das concentrações dos compostos presentes no banho ácido, analisando o tempo de decapagem e a aparência do aço	Constituição do banho: ácido fluorídrico (0 a 60 g/l), ácido sulfúrico (50 a 200 g/l), anião cloreto (1 a 5 g/l), Fe ³⁺ (> 15g/l), peróxido de hidrogénio; Potencial redox: >300 mV; Relação de Fe ³⁺ /Fe ²⁺ >1	Analisa-se que a adição de iões cloreto aumenta a velocidade de decapagem. Mas acima de 10 g/l ocorre um ataque prejudicial ao aço. Para garantir a regularidade da decapagem é necessário uma injeção de ar e uma recirculação da solução da decapagem. Uma diminuição do HF livre implica um aumento do H ₂ SO ₄ livre. Exemplo de um ensaio com 30 minutos de decapagem: [HF] = 35 g/l, [H ₂ SO ₄] = 120 g/l, [Fe ³⁺] = 30 g/l, [Cl ⁻] = 3 g/l, T = 60°C, ΔP = 159 g/m ³ .	(Negri et al., 2004)

Nesta subsecção apresenta-se também um exemplo de um estudo do comportamento do aço austenítico durante a decapagem na Tabela 2.2, de modo a compreender a função dos banhos ácidos no aço em estado negro (aço inoxidável com a camada de óxido).

Tabela 2.2 - Estudo do comportamento do aço durante a decapagem.

Estudo	Tecnologias	Condições de operação	Conclusões	Referências
Determinação do comportamento de amostras de aço inoxidável durante a decapagem.	Imersão das amostras no banho ácido e análise microscópica (200x) às superfícies aos 30s, 90s e 150s ao longo do tempo da decapagem.	Constituição do banho: ácido nítrico (2,3M) e ácido fluorídrico (2M); Temperatura: 55°C. Amostras de aço austenítico (recozimento a 1070°C durante 8 minutos); Amostra de tamanho reduzido.	Aos 30s, o óxido é parcialmente removido da superfície. Aos 150s, o óxido é completamente removido. Ao longo da decapagem, a remoção do óxido é mais lenta nos limites do grão. E a espessura do óxido na superfície vai diminuindo.	(Casals, 2010)

Segundo Casals (2010), a camada de óxidos é removida ao longo do tempo de decapagem, no entanto nos limites do grão a dificuldade é elevada.

2.3.1.2. Controlo das variáveis

As principais variáveis de controlo nos banhos ácidos no processo de decapagem são o potencial redução-oxidação, quantidade de ferro, concentrações dos ácidos, densidade e temperatura da solução ácida.

Potencial Redução-Oxidação

O potencial Redução-Oxidação ou potencial redox representa a transferência de eletrões entre dois metais. A oxidação é um processo que procede da perda de eletrões, enquanto que a redução é um processo que procede do ganho de eletrões. A medição do potencial redox é baseada na diferença de potencial causada entre o elétrodo de Pt/Ag/AgCl e um elétrodo de referência. Estes elérodos permitem a medição em volts (V) ou milivolts (mV) e, para calcular o potencial de redução-oxidação em condições diferentes do padrão, utiliza-se a equação de Nerst,

$$E = E_0 - \left(\frac{RT}{nF}\right) \ln(Q), \quad (2.1)$$

em que R é a constante dos gases (8,314 J/K.mol), F é a constante de Faraday (96,48 kJ/V.mol), n é o número de eletrões envolvidos e Q é o coeficiente de reação.

Os elérodos são utilizados para controlar processos químicos que contenham reações reversíveis, tal como, a reação mais frequente na decapagem, que é a transformação de Fe^{3+} em Fe^{2+} , e vice versa. No banho ácido os iões de ferro (III) são mantidos por um agente de oxidação. Contudo, durante o processo de decapagem os iões de ferro (III) são convertidos em iões de ferro (II) através de uma reação de redução. Deste modo, o banho fica enriquecido em

iões de ferro (II), o que não é o pretendido, e o potencial de redução-oxidação diminui provocando uma diminuição da eficiência na decapagem. Seguidamente, os iões de ferro (II) sofrem uma reação de oxidação com a adição de um agente oxidante, convertendo-os novamente em iões de ferro (III) (Giordani et al, 2012).

Quantidades de ferro

As quantidades de ferro a analisar num banho de decapagem são: ferro (II), ferro (III) e ferro total. O ferro (II) é um contaminante nos banhos ácidos e o ferro (III) ajuda na reação da decapagem pois desempenha a função de catalisador. A quantidade de ferro (III) no banho deve ser maior que a quantidade de ferro (II), para que o banho realize a decapagem com eficiência (Giordani et al, 2012).

A quantidade de ferro total é o somatório da quantidade de ferro (II) e de ferro (III). Quando a quantidade de ferro total é 12 vezes superior à quantidade inicial, significa que o banho atingiu o fim de vida.

Concentrações dos ácidos envolventes

As concentrações dos ácidos no banho da decapagem é um parâmetro importante, sendo que a gama de valores recomendada depende dos ácidos utilizados. As concentrações são inseridas a partir da medição das condutividades em mS/cm e converte-se para g/L. Quando as concentrações dos ácidos saem da gama de valores ideais, os banhos não funcionam de forma correta e originam não conformidades no produto metálico. As possíveis não conformidades dependem do ácido e se este permanece em falta ou em excesso no banho químico.

Densidade

A densidade do banho de decapagem é um parâmetro de controlo a ter em conta, uma vez que a partir deste estima-se a idade do banho. Considera-se um banho novo quando tem a densidade baixa (aproximadamente $1,1 \text{ g/cm}^3$) e um banho no fim de vida quando apresenta uma densidade elevada (aproximadamente $1,4 \text{ g/cm}^3$).

Temperatura

A temperatura é um parâmetro importante nos banhos de decapagem, uma vez que é inversamente proporcional ao tempo de decapagem, o que significa que ao aumentar a temperatura ocorre um aumento da velocidade da decapagem. No entanto, as temperaturas elevadas levam a uma maior evaporação dos ácidos e em termos de segurança dos colaboradores isso é prejudicial. Por este motivo, este parâmetro tem que ser sacrificado, operando com temperaturas abaixo do que é considerado ser ideal para ter uma maior eficiência da decapagem.

3. METODOLOGIA

3.1. A metodologia Seis Sigma

A metodologia Seis Sigma é baseada em ferramentas estatísticas para melhorar o desempenho de processos de produção. Permite identificar defeitos ou erros e, posteriormente, contribuir para a sua eliminação. De um modo geral, permite alcançar uma melhoria contínua do processo que só subsiste quando este é “standardizado” e cuja situação atual se pode avaliar (Gupta et al., 2012). Este método é fundamentalmente usado para alcançar a liderança no setor da atividade da empresa, reduzindo a variação dos processos, os tempos de ciclo, os custos e consequentemente obtendo os melhores resultados nesse setor da indústria.

O conceito Seis Sigma teve origem na empresa de produtos eletrónicos, Motorola na década de 80. O objetivo da implementação do Seis Sigma foi tornar a empresa competitiva no mercado e marcar uma posição de impenhência junto dos novos concorrentes, que produziam a baixo custo. Na década de 90 houve uma forte expansão na implementação do método devido aos resultados excelentes alcançados por empresas tais como a General Electric, a IBM, a Motorola, entre outras (Gupta et al., 2012).

Atualmente, o Seis Sigma é usado nas diferentes áreas produtivas, tais como nas indústrias, telecomunicações e saúde.

3.1.1. Fundamentos do Seis Sigma

A letra Sigma (σ) pertence ao alfabeto grego, e representa aqui um desvio padrão de uma variável processual. A variação de uma variável processual está diretamente relacionada com o grau de proximidade dos resultados à média (Teixeira, 2014).

A designação de seis sigma advém do facto de se ter seis desvios padrão para caraterizar a distância média entre o limite superior e o limite inferior de especificação processual. Cada um destes desvios, ou nível sigma, estima a probabilidade da produção de um defeito num processo. Quanto mais elevado o nível sigma melhor será o desempenho do processo. Uma vez que o 6σ corresponde a 1 defeito em cada 1000 milhões de oportunidade (Castro, 2013).

Segundo Carreira (2013), para o método seis sigma o defeito é algo que prejudica a eficiência do processo e, por conseguinte, isso significa, que há oportunidades de melhoria.

O objetivo da aplicação de seis sigma em processos industriais é diminuir a variação do nível de sigma para alcançar indicadores com desvios reduzidos, de forma que a satisfação dos clientes seja excedida com quase todos os produtos.

Segundo Lucas (2002), o nível de sigma é obtido a partir do número de defeitos produzidos pelo processo (DPMO - Defeitos por milhão de oportunidades) através da visualização de uma tabela de conversão. A Tabela 3.1 é a tabela de conversão para os níveis de sigma, em que se supõe um deslocamento da média do processo de $1,5\sigma$.

Tabela 3.1 - Níveis de Sigma, DPMO e rendimento. (Lucas, 2002) .

Nível Sigma	DPMO	Rendimento (%)
1	697700	30.90
2	308700	69.15
3	66807	93.32
4	6210	99.38
5	233	99.98
6	3.4	99.99

Atualmente, as empresas com a metodologia Seis Sigma situam-se no nível 4, ou seja, 6210 defeitos por um milhão de oportunidades de melhoria com um rendimento de 99,38% no processo de produção.

Para uma empresa atual garantir no futuro o sucesso no mercado necessita de investir na metodologia Seis Sigma e obter no seu processo de produção o nível de sigma 6, pois prevê-se que futuramente as indústrias estarão a operar com um nível de qualidade elevada.

3.1.2. Intervenientes do Seis Sigma

Para Castro (2013), a responsabilidade da gestão de topo da empresa não pode ser semelhante em todos os colaboradores. Por isso, as responsabilidades e funções na implementação do seis sigma têm de ser repartidas pela equipa consoante o seu nível de formação (ver Tabela 3.2.).

Tabela 3.2 - Terminologia correspondente aos colaboradores da equipa seis sigma (por ordem de responsabilidade).

<i>Champion</i>	Gerente da equipa de projeto e domina os projetos seis sigma.
<i>Black Belt</i>	Experiência e conhecimentos em projetos seis sigma.
<i>Green Belt</i>	Lidera projetos simplistas sob a orientação de um <i>Black Belt</i> e tem conhecimentos em projetos seis sigma.
<i>Yellow Belt</i>	Tem conhecimentos gerais do seis sigma.
<i>White Belt</i>	Tem conhecimentos mínimos do seis sigma.

3.1.3. A metodologia do DMAIC

Um projeto Seis Sigma tem a necessidade de ser estruturado e “standardizado” através de ferramentas, tal como a metodologia DMAIC. A metodologia DMAIC representa as seguintes etapas: “Define”, “Measure”, “Analyze”, “Improve” e “Control”. A metodologia DMAIC permite uma focalização no objetivo final, e leva a que o projeto seja realmente melhorado, e com um consequente retorno no investimento.

A fase Definir é a primeira fase de um projeto seis sigma na qual se descreve todo o projeto. Segundo Gupta et al., (2012), a etapa definir delinea os requisitos do cliente e determina o ponto de partida para o projeto. A fase Medir é a segunda fase de um projeto seis sigma onde se estabelece as oportunidades de melhoria, percebendo quais as características que influenciam de forma negativa ou positiva o desempenho do processo. Para estabelecer as oportunidades é necessário realizar um levantamento das entradas no processo e medir o desempenho destas. A fase Analisar é a terceira fase de um projeto seis sigma onde se identifica e estuda as correlações e tendências entre as entradas e as saídas do processo. Nesta fase a análise da informação é crucial para compreender as variações excessivas ou inconsistências, uma vez que se as variações estiverem relacionadas com o processo, tem-se de realizar uma análise sobre a capacidade ou modificar o processo. Caso contrário, então o processo só necessita de alguns ajustes. A fase Melhorar é a quarta fase de um projeto seis sigma que desenvolve soluções ou ações de implementação para os problemas encontrados anteriormente, conseguindo assim uma otimização do processo. A fase Controlar é a última fase de um projeto seis sigma que tem como objetivo manter o nível sigma alcançado e continuar com o sucesso das ações implementadas.

Na Tabela 3.3 são apresentadas algumas das ferramentas correspondentes a cada fase da metodologia DMAIC, inclusive as utilizadas no presente estudo.

Tabela 3.3 - Ferramentas da metodologia DMAIC

Definir	Mapa de processos; SIPOC; CTQ
Medir	DPMO; Nível Sigma; Análise estatística; Diagrama de dependências; OEE
Analisar	Análise Causa-Raiz; Análise de regressão linear; Diagrama de Spaghetti
Melhorar	Brainstorming; Experiências comparativas
Controlar	Planeamento futuro

Uma das principais ferramentas aqui usada é a ferramenta OEE (*Overall Equipment Effectiveness*). Tem como objetivo informar da eficiência do equipamento, conhecendo o tempo de produção, a quantidade de produto processado em conformidade e a quantidade de produto não conforme. De acordo com Francis (1999), a OEE é aplicada industrialmente com o objetivo de maximizar a produtividade dos equipamentos e compreender se a eficiência está a ser comprometida.

Aplicação da metodologia DMAIC

4. FASE DEFINIR

Neste capítulo é apresentada a equipa de seis sigma, definição do problema (secção 4.2) e do plano de projeto (secção 4.3). É também apresentada uma breve referência à Ferramenta SIPOC (secção 4.4). Uma descrição detalhada do setor da decapagem na Böllinghaus Steel é dada ao longo da Secção 4.5. Finalmente, na secção 4.6 é apresentada de forma sucinta a abordagem segundo a ferramenta CTQ em que é identificada a necessidade principal da decapagem do ponto de vista dos clientes.

4.1. Definição da equipa

A equipa de trabalho é definida hierarquicamente através do nível de experiência na metodologia DMAIC, designada de “Belts”. Desta forma, apresenta-se a constituição da equipa:

- ✓ Champion, Bruno Pedro (diretor geral)
- ✓ Black belt, José Santos (diretor de produção)
- ✓ Green belt, Dina Domingues (autora da presente dissertação)
- ✓ Yellow belts, Chefes do setor da decapagem
- ✓ White belts, Colaboradores do setor da decapagem

4.2. Definição do problema

O problema concentra-se na necessidade de aumentar o desempenho e a produtividade do setor da decapagem da Böllinghaus Steel. O desempenho da decapagem é influenciado por diferentes fatores:

- Ácidos consumidos;
- Produção de resíduos;
- Tempos de decapagem;

Ácidos consumidos

O banho ácido é constituído por ácido sulfúrico, ácido fluorídrico, peróxido de hidrogénio e água. Os ácidos redutores são o ácido sulfúrico e o fluorídrico, e o oxidante é o peróxido de hidrogénio. O ácido sulfúrico tem o papel de desengordurante, ou seja a camada

de óxido na superfície metálica é amolecida. O ácido fluorídrico é utilizado para a remoção da camada de óxido.

Os principais gastos no setor da decapagem estão relacionados com os banhos ácidos, uma vez que estes necessitam de uma elevada quantidade de ácidos ao longo do seu tempo de vida. Após a formação do banho ácido, este aumenta o tempo de vida à medida que este é utilizado. O banho consumirá cada vez mais ácidos e outros compostos para garantir uma ótima decapagem do aço inoxidável. Caso não se adicione os compostos que o banho necessita, este provocará um aumento do tempo da decapagem e acabará por não cumprir a sua função. A Figura 4.1 apresenta os principais gastos financeiros do setor da decapagem no ano 2014.

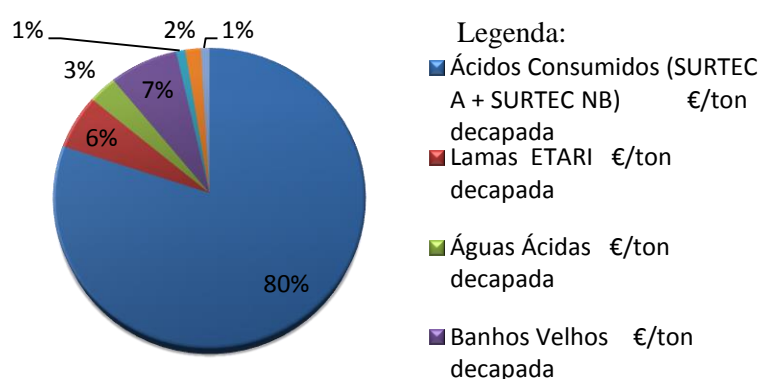


Figura 4.1 - Principais gastos financeiros do setor da decapagem no ano 2014.

Os ácidos consumidos no banho são o custo mais avultado, correspondendo a uma percentagem de 80% do total dos custos no setor da decapagem. O custo total por tonelada rondou os 20,61€ por mês. A empresa Böllinghaus em 2014 despendeu aproximadamente 188 941,45 € em Surtec A (peróxido de hidrogénio) e Surtec NB (ácido fluorídrico). O ácido sulfúrico não foi contabilizado nesta contagem porque é o ácido mais barato comparativamente aos ácidos anteriormente mencionados.

Produção de resíduos

Quando o banho alcança o fim de vida, ou seja a partir do momento em que não realiza a sua função de forma ótima e consome quantidades elevadas de ácido, considera-se que não é rentável a sua manutenção e o banho tem de ser substituído. Então, é necessário remover o banho, limpar o tanque onde permanecia e enviá-lo para tratamento externo, o que se traduz em mais um gasto relacionado com o banho.

O tanque de borbulhação também provoca gastos neste setor, uma vez que as águas ácidas removidas deste tanque têm de ser tratadas na ETARI (Estação de tratamentos de águas

residuais industriais). Por sua vez, este tratamento forma lamas devido à quantidade de cal usada para tratar as águas ácidas.

Tempos de decapagem

Um problema de nível humano é o facto de ocorrer tempos de decapagem superior ao valor médio esperado. Tendo em conta que cada tipo de aço requer tempos de decapagem diferentes, os colaboradores definem tempos de decapagem aproximados, superiores ao tempo estritamente necessário, o que provoca no banho ácido um maior consumo de ácidos.

Os problemas enunciados anteriormente são os principais problemas do processo de decapagem identificados até ao momento que devem ser eliminados durante o tempo de projeto para as quais deverão ser propostas soluções neste projeto para os eliminar e, conseqüentemente, diminuir os custos relativos ao setor da decapagem.

4.3. Definição do plano de projeto

A definição do plano de projeto é fundamental para cumprir com os objetivos do presente projeto e está dividido pelas cinco fases do Seis Sigma (Definir, Medir, Analisar, Melhorar, Controlar). O plano de projeto detalhado encontra-se no anexo A.

4.4. SIPOC

Para identificar todos os intervenientes que possivelmente podem contribuir para o êxito ou fracasso do processo produtivo, utilizou-se a ferramenta SIPOC que provém do acrónimo Supplier (Fornecedor), Input (Entrada), Process (Processo), Output (Saída) e Customer (Cliente) (Gupta et al., 2012). Esta é uma ferramenta que auxilia a compreensão das entradas, das saídas e de todos os passos do processo.

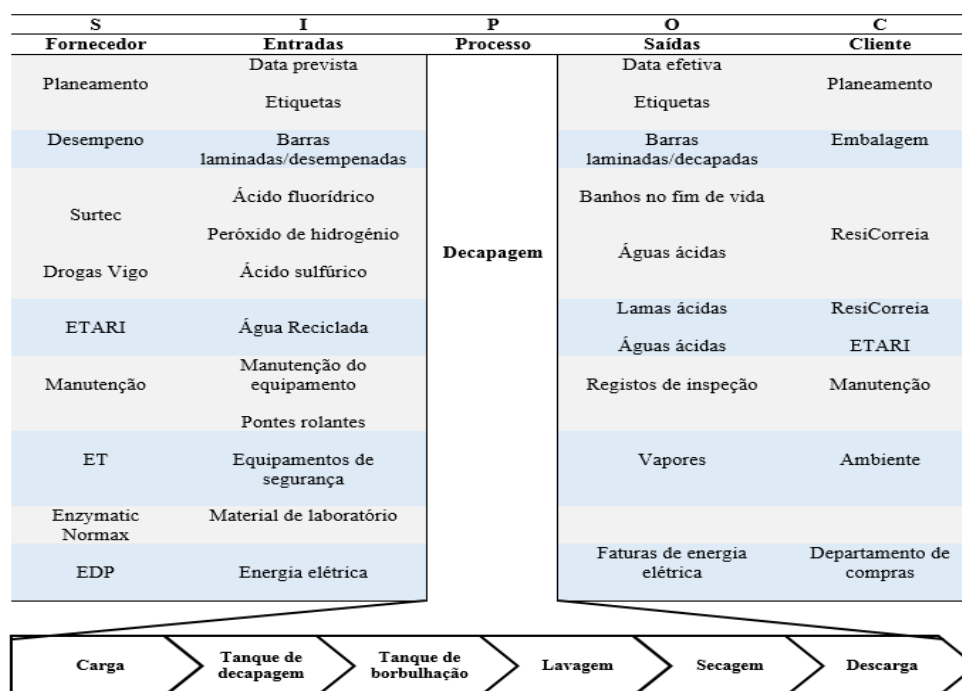


Figura 4.2 - Diagrama de SIPOC do setor da decapagem.

Na Figura 4.2 apresenta-se todas as situações relacionadas com o processo da decapagem na ferramenta SIPOC, garantindo o adequado conhecimento para uma melhor investigação do processo e assim, ser possível a resolução dos diferentes problemas associados.

4.5. Descrição do setor da decapagem química

A decapagem química na empresa Böllinghaus é utilizada para a remoção das camadas de óxidos e das impurezas na superfície do aço inoxidável.

O processo da decapagem contempla a seguinte ordem de operações: carga, decapagem, borbulhação, lavagem a jato, secagem e descarga. Em seguida são descritas cada uma das operações.

Carga – Os atados (conjunto de barras de aço de uma qualidade com determinadas características específicas) são desfeitos e procede-se ao carregamento manual dos cavaletes com material em estado negro, cumprindo uma distância entre as barras de aproximadamente 2 a 3 cm, por forma a permitir uma eficiente lavagem.

Decapagem – Imersão do cavalete carregado no banho ácido (tanque de decapagem). O cavalete permanece cerca de 2h no banho ácido (com as condições ideais) a uma temperatura de 33°C.

Borbulhaço – Imersão do cavalete carregado no tanque de borbulhaço durante 10 a 15 minutos. O objetivo principal é remover vestígios dos químicos provenientes dos tanques de decapagem e óxidos de ferro ainda depositados na superfície das barras.

Lavagem a jato – Remoção dos vestígios de óxidos à superfície das barras recorrendo a uma lavagem com jato de água a alta pressão (350 bar). As barras de aço no fim deste procedimento ficam com um aspeto branco, sem manchas de oxidação e com uma cor cinzenta uniforme. Caso o aço se encontre mal decapado (com não conformidades), deverá retornar ao banho o tempo necessário até este ser decapado eficazmente. As principais não conformidades são os pontos pretos e a oxidação na superfície. Os pontos pretos surgem da falta de lavagem e a ação corretiva será repetir a lavagem. A oxidação na superfície surge com uma decapagem inadequada e a ação corretiva é voltar à decapagem.

Secagem – Secagem do material na estufa durante 15 a 30 minutos a uma temperatura controlada de aproximadamente 50°C.

Descarga – As barras são removidas do cavalete e são colocadas no berço móvel de modo a poderem formar novamente um atado. O atado é transportado e inserido num berço retangular para aguardar pela fase seguinte do processo de produção de aço inoxidável.

De modo a compreender e a interpretar o processo da decapagem de uma forma simples apresenta-se a Figura 4.3.

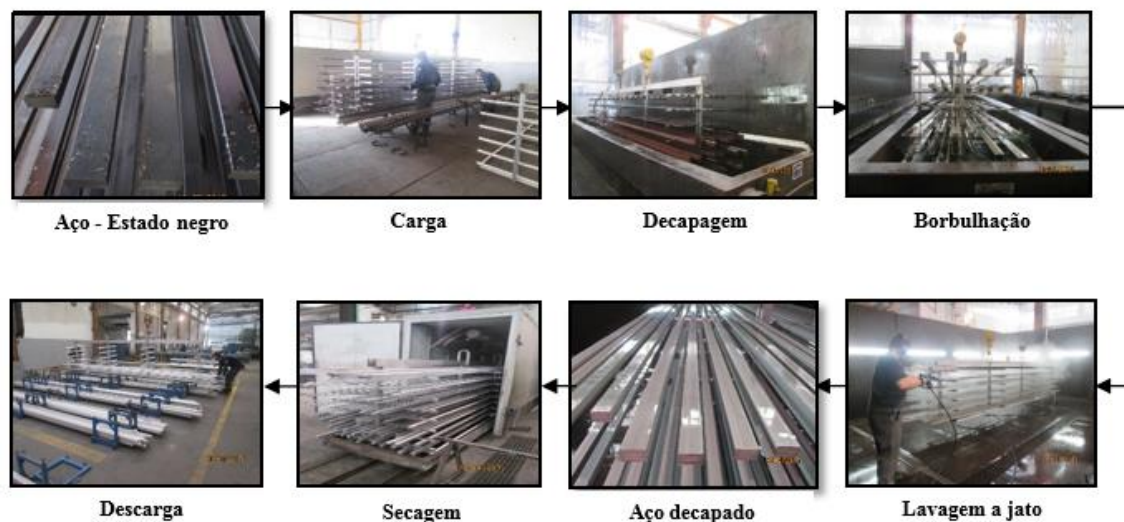


Figura 4.3 - Processo de decapagem química na empresa Böllinghaus.

Com o objetivo de conhecer os deslocamentos do material ao longo do processo apresenta-se na Figura 4.4 o diagrama de Spaghetti do setor da decapagem química.

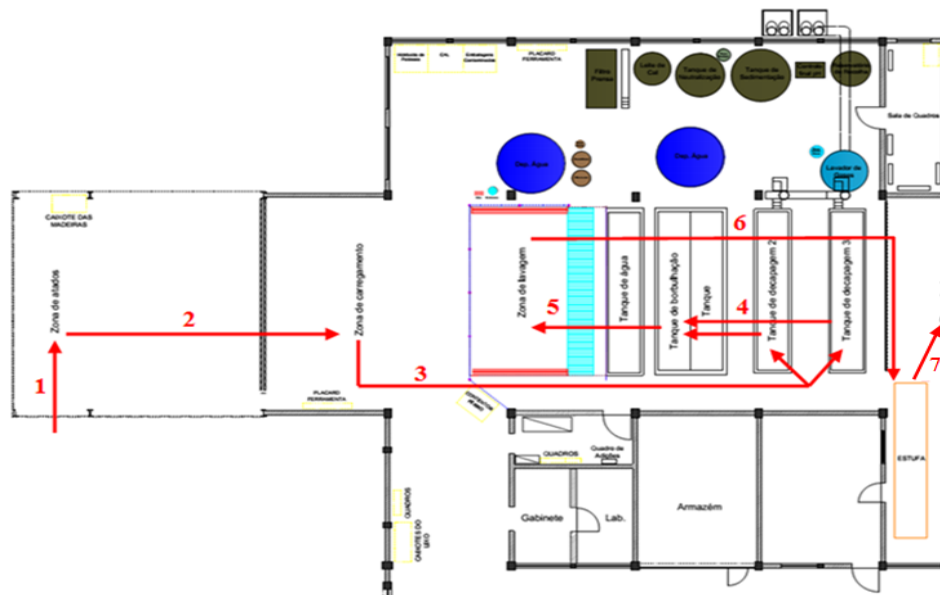


Figura 4.4 - Diagrama Spaghetti do setor da decapagem na empresa Böllinghaus.

Tanque de decapagem

A imersão do cavalete no tanque de decapagem é a etapa fundamental do processo, uma vez que neste se remove as camadas de óxidos das superfícies metálicas quando se imerge o aço no banho ácido. O banho ácido é constituído por 7% de banho ativo, 7% de ácido sulfúrico, 9% de ácido fluorídrico (Surtec NB) que também inclui sequestrantes¹, tensoativos não iónicos² e inibidores, 7% de peróxido de hidrogénio (Surtec A) e 70% de água. Esta constituição perfaz um total de 10 000 litros e tem um tempo de vida médio de 35 dias.

Durante o seu tempo de vida, o banho ácido consegue alcançar uma produtividade de até 895 toneladas de aço inoxidável.

Este banho ácido está direcionado essencialmente para os aços austeníticos sendo também a decapagem de aços endurecidos por precipitação e duplex.

Reações químicas

As reações eletroquímicas que ocorrem eliminam a camada de óxidos realizando uma dissolução da camada acima do metal base e pelo efeito físico do hidrogénio gasoso libertado de acordo com as seguintes reações químicas (Henkel, 1998):

¹ Têm a função de quebrar e dispersar os sólidos suspensos e apresentam elevado desempenho na remoção de iões metálicos sem atacar o metal base (Mang, 2014).

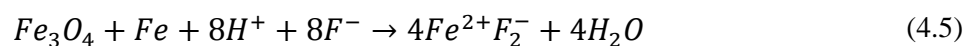
² Têm a função de manter a solubilidade da solução (Mang, 2014).



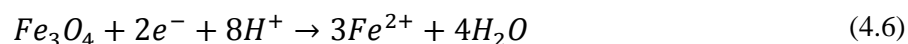
Para a dissolução da camada de óxido é necessário ter um conjunto de dois elétrodos, que envolvem duas reações, oxidação e redução. As reações anteriores são reações de oxidação-redução. As reações (4.1), (4.2) e (4.3) são reações de redução em que a espécie química redutora tende a ceder elétrons, e se converte em uma espécie oxidada. A reação (4.4) é uma reação de oxidação, em que a espécie química oxidada tende a captar elétrons, e se converte em uma espécie reduzida (Ferreira, 2015). O conjunto de dois elétrodos forma uma célula eletroquímica.

Basicamente o processo de dissolução da camada de óxido pode ser decomposto em três processos: o processo anódico que envolve reações de oxidação em que se dá a passagem de íons à solução ácida e a acumulação de elétrons na superfície dos óxidos; o transporte de elétrons através do condutor metálico (do ânodo) para o cátodo) e deslocação dos aniões e catiões no condutor iônico (solução ácida); processo catódico que envolve reações de redução através dos elétrons no cátodo (metal) e das espécies na solução que os aceitam, e que formam gases e sais metálicos (lamas).

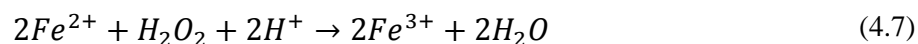
Na camada hematite e magnetite existem numerosos microporos, sendo neles que ocorrem as reações de redução (catódica). Tanto na camada hematite e como na magnetite ocorre a oxidação do ferro que provoca a redução dos íons Fe^{3+} . Em seguida, os íons ferrosos (Fe^{2+}) deslocam-se desde as camadas de óxidos até à solução ácida. Este é o passo mais lento do processo reacional. Contudo, na presença do ácido fluorídrico, os íons F^- podem afetar a deslocação referenciada anteriormente, uma vez que poderá ocorrer uma alteração de potencial e formar fluoretos, como é demonstrado na reação química seguinte:



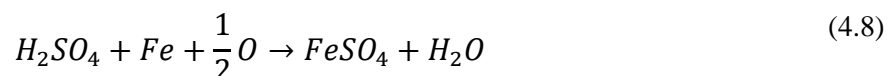
De qualquer forma, o processo de dissolução redutora implica uma transferência de íons metálicos desde a camada de óxido, seguido por uma difusão destes através da camada de óxido para a interface óxido/ solução. Por fim, os íons metálicos alcançam o meio reacional, ou seja o banho ácido. Este passo é caracterizado pela seguinte reação de redução:



Após a completa dissolução da magnetite, a superfície metálica fica livre de óxidos. Devido ao facto de que a concentração de Fe^{3+} poder variar com as várias reações, utiliza-se o peróxido de hidrogénio para assegurar a presença de Fe^{3+} durante o processo de decapagem. A utilização deste provoca a reação (4.7).



A adição do ácido sulfúrico no banho ácido serve para promover a dissolução das camadas de óxido, dando origem à seguinte reação.

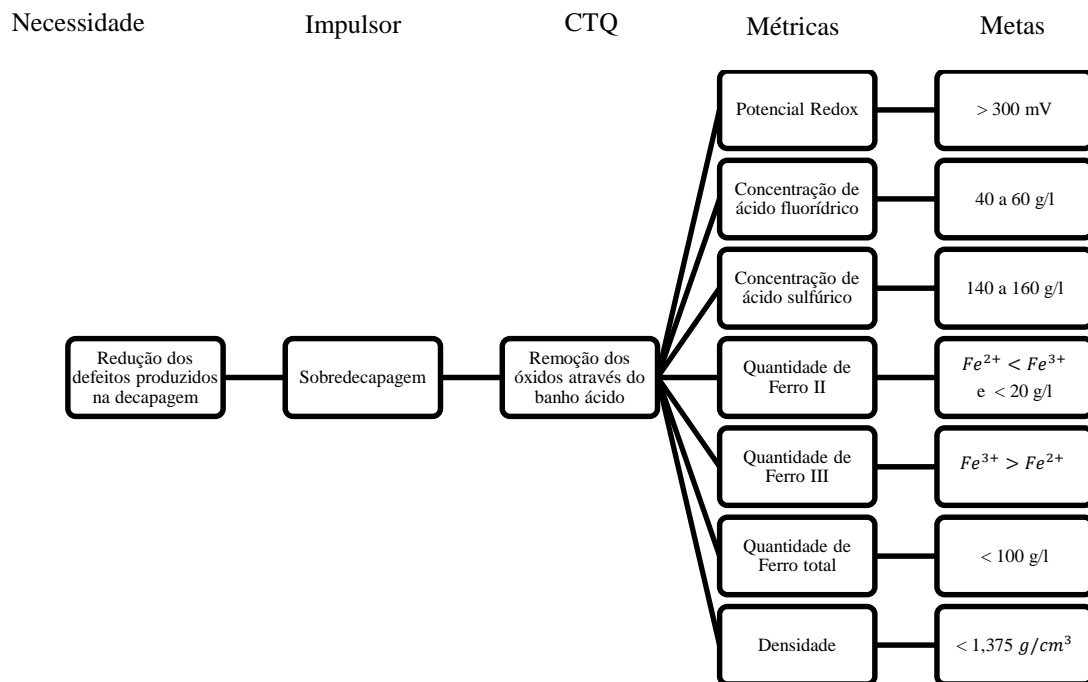


As reações apresentadas anteriormente ocorrem nos banhos ácidos devido às imersões de aço em estado negro, sendo que para que a qualidade de remoção da camada de óxidos seja elevada é necessário identificar os parâmetros a controlar nos banhos ácidos que serão apresentados na Secção 4.6.

4.6. Requisitos críticos do processo de decapagem para a qualidade

Para identificar os requisitos críticos do processo de decapagem para a qualidade dos banhos ácidos utilizou-se a ferramenta CTQ, “Critical to quality”. Teoricamente, o crítico para a qualidade identifica o que para o cliente (setor seguinte – Embalagem) é de extrema importância, ou seja um passo crítico, antes de determinar os seus requisitos. Após o conhecimento das necessidades do cliente, estas podem transformar-se em requisitos críticos para a qualidade.

Uma necessidade do cliente pode corresponder a mais do que um CTQ, ou pode-se gerar mais do que um CTQ para satisfazer uma necessidade.



Considerando que a necessidade principal da decapagem para os clientes é a redução dos defeitos produzidos neste setor e o impulsor é a sobredecapagem, então determina-se o requisito crítico para a qualidade que é a remoção das camadas de óxidos à superfície do material metálico.

5. FASE MEDIR

Neste capítulo são apresentadas as composições dos banhos ácidos, sendo também descritas as experiências laboratoriais (secção 5.2), como as análises químicas aos banhos ácidos e as microscopias óticas ao aço inoxidável. Relativamente à produção do setor (secção 5.3), esta é analisada com algumas ferramentas do DMAIC e também são caracterizados os métodos de trabalho de cada turno com o Diagrama de Gantt. Por fim, é calculado o nível sigma relativamente aos tempos de decapagem.

5.1. Composições dos banhos e águas ácidas

As composições dos banhos ácidos existentes no processo de decapagem são importantes para a compreensão do mesmo. O banho ácido, para além dos ácidos já referidos também tem na sua constituição níquel, ferro, fluoretos, crómio, cobre e molibdénio. Estes compostos estão presentes na solução ácida pelo processo de decapagem, uma vez que imergindo material na solução a camada de óxido irá reagir e libertar os seus constituintes. Resultando numa coloração esverdeada que escurece ao longo da vida do banho, e na Figura 5.1 apresenta-se uma amostra de um banho ácido ao longo do seu tempo de vida.



Figura 5.1- Coloração ao longo da vida do banho (do início para o fim de vida).

Para confirmar a informação acima mencionada, realizou-se análises químicas aos compostos presentes num banho ácido já na sua fase final de vida, tendo obtido os resultados da Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Análises químicas ao banho de decapagem.

Ensaio / Método	Resultados	Unidades
pH (20,1°C)	3,4	Escala de Sorensen
Níquel	14000	mg/L Ni
Ferro	54000	mg/L Fe
Fluoretos	29000	mg/L F
Cobre	140	mg/L Cu
Crómio	19000	mg/L Cr
Condutividade a 20°C	>11000	µS/cm a 20 °C
Zinco	37	mg/L Zn
Molibdénio	716	mg/L
Dióxido de Carbono Livre	320000	mg/L CO2

Os teores dos metais variam ao longo da vidas dos banhos, em estudos anteriores verificou-se que, por exemplo, a concentração de cobre varia sensivelmente de 300 a 4000 mg/L, a concentração de níquel varia de 12000 a 15000 mg/L e a concentração de crómio varia de 20000 a 30000 mg/L (Baptista, 2011).

Relativamente às águas ácidas produzidas no processo de decapagem, estas também contêm os compostos presentes nas soluções ácidas mas em menor quantidade, e cálcio proveniente do tratamento das águas. Realizou-se análises às águas ácidas já previamente tratadas e os resultados apresentam-se no Anexo B.

5.2. Parte experimental

Nesta subsecção são abordados os procedimentos utilizados nas análises químicas aos banhos ácidos e na microscopia ótica ao aço inoxidável.

5.2.1. Análises químicas aos banhos ácidos

As análises químicas aos banhos ácidos são: potencial redox, densidade, condutividade do ácido sulfúrico, condutividade do ácido fluorídrico, quantidade de ferro II e ferro III.

Os equipamentos necessários para as análises são:

- *Hach HQ 30d flexi*, com a possibilidade de usar duas sondas, uma de medição do potencial redox e outra de condutividade (erro $\pm 0,01$ pH; ± 1 mV; $\pm 0,1$ °C).
- Balança *Kern* (cd=0,1g), máximo de 1200g, erro $\pm 0,398$ g.
- *Sension Hach* (mm150), erro $\pm 0,01$ pH.

Todos os procedimentos experimentais descritos em seguida podem ser também consultados com mais pormenor nos Anexos C, D e E e o respetivo boletim de análise no Anexo F.

5.2.1.1. Potencial Redox

A medição do potencial redox tem como objetivo determinar a quantidade de peróxido de hidrogénio que o banho contém no momento.

O procedimento inicia com a recolha de uma amostra de cada banho ácido e arrefece-se esta até às seguintes temperaturas: 20 a 25°C. Em seguida, coloca-se o elétrodo do Potencial Redox Hach e procede-se ao registro de três leituras. O elétrodo é posteriormente lavado, limpo e mergulhado numa solução de KCl (3M). Para a calibração foram utilizadas soluções tampão de 468 mV a 25°C.

Após a obtenção dos valores do potencial redox presentes na solução, analisa-se a necessidade de adição ou não de peróxido de hidrogénio. O valor do Potencial Redox é considerado ideal para o banho ácido quando este permanece acima dos 300 mV.

5.2.1.2. Densidade

A determinação da densidade de um banho ácido tem como objetivo conhecer a idade deste, de modo a perceber a capacidade produtiva e o consumo de ácidos.

O procedimento inicia com a colocação de um balão de 100ml na balança (cd=0,1g) e efetuar a tara. Após a recolha de uma amostra de cada banho enche-se o balão com a solução ácida e regista-se a leitura do peso em gramas.

A densidade é calculada dividindo o peso da solução pelo seu volume (100 ml). Quando o banho é novo, o valor da densidade é baixo, correspondendo a cerca de 1,143 g/cm³. O limite máximo admissível é de cerca 1,375 g/cm³.

5.2.1.3. Condutividade de Ácido sulfúrico

A medição da condutividade do ácido sulfúrico tem como objetivo determinar a concentração de ácido sulfúrico presente no banho ácido.

A condutividade é dependente da temperatura, quanto mais alta a temperatura da solução mais elevada será a sua condutividade. Deste modo, justifica-se a medição da condutividade na seguinte gama de temperaturas, de 15 a 20°C.

O procedimento experimental inicia com a remoção de 2 ml do banho ácido e colocação desta amostra num balão de 100 ml, perfazendo-o com água destilada. Coloca-se a solução num

Otimização do processo de decapagem química numa empresa de produção de perfis de aço

copo e procede-se ao registro de três leituras da condutividade de ácido sulfúrico (mS/cm) com a utilização do eletrodo de condutividade Hach. O eletrodo é posteriormente lavado e limpo. Para calibração foram utilizadas soluções tampão de 12.88 mS/cm a 25°C.

Para converter a condutividade em concentração (g/l) utiliza-se a Figura 5.2.

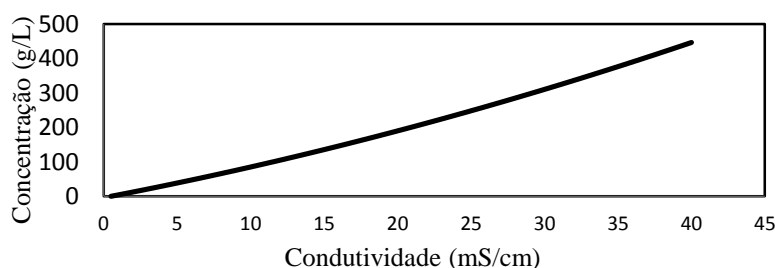


Figura 5.2 - Relação entre a condutividade e a concentração do ácido sulfúrico.

Após a obtenção dos valores da concentração de ácido sulfúrico presentes na solução, analisa-se a necessidade de adição ou não de ácido sulfúrico. A gama de valores de referência é de 140 a 160 g/L de ácido sulfúrico, caso o valor obtido esteja fora da gama de valores analisa-se qual a ação para o valor ficar dentro da gama.

5.2.1.4. Condutividade de Ácido fluorídrico

A medição da condutividade do ácido fluorídrico tem como objetivo determinar a concentração de ácido fluorídrico presente no banho ácido.

O procedimento experimental inicia com a remoção de 2 ml da solução ácida e colocação desta amostra num balão de 100 ml, e perfazendo-o com água destilada. Coloca-se a solução num copo e adiciona-se 2 mL de nitrato de ferro ($Fe(NO_3)_3$) misturando-o na solução perfeitamente. Na presença do ácido fluorídrico os iões F^- deslocam-se provocando uma alteração de potencial que altera a condutividade da solução. Procede-se ao registro de três leituras de condutividade de ácido fluorídrico com a sonda de condutividade Hach. Para converter a condutividade em concentração de ácido fluorídrico utiliza-se a Figura 5.3.

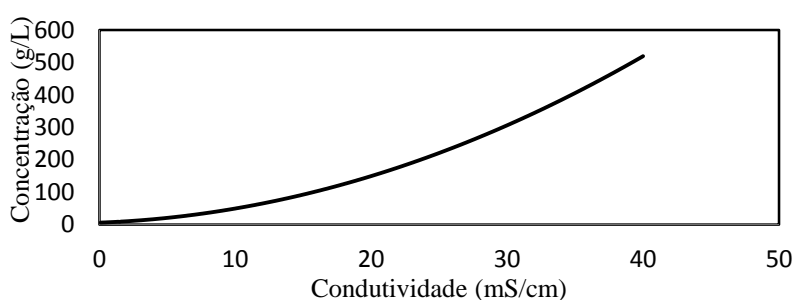


Figura 5.3 - Relação entre a condutividade e a concentração do ácido fluorídrico.

Após a obtenção dos valores da concentração de ácido fluorídrico presente na solução, analisa-se a necessidade de adição ou não de ácido fluorídrico. A gama de valores de referência é de 40 a 60 g/L de ácido fluorídrico, caso o valor obtido esteja fora da gama de valores analisa-se qual será a ação que fará o valor ficar dentro da gama.

5.2.1.5. Determinação de pH

O pH é determinado utilizando o medidor *Sension Hach*. Para a calibração foram utilizadas soluções tampão pH 4,0 e 7,0. O eletrodo é mergulhado na solução ácida entre 20 a 25°C e regista-se a leitura de pH.

5.2.1.6. Ensaio de Ferro II

O ensaio de Ferro II tem como objetivo determinar a quantidade presente de Ferro II em g/L no banho ácido. Os reagentes necessários para o ensaio de ferro II são: solução padrão de permanganato de potássio 0,005M e ácido sulfúrico (25%).

O procedimento experimental inicia com a preparação de uma solução de 10 ml da amostra ácida num balão volumétrico de 100ml, perfazendo-o com água desionizada. Em seguida, 10 ml desta diluição é colocada num balão erlenmeyer de 300ml e adiciona-se 50 ml de água desionizada e 20 ml de ácido sulfúrico. Por fim, mistura-se e titula-se a solução com permanganato de potássio 0,005M até atingir o ponto de viragem de incolor a rosa (Figura 5.4).



Figura 5.4 - Titulação com permanganato de potássio.

Regista-se o valor consumido de permanganato de potássio (ml) e multiplica-se por 1,396, obtendo-se a quantidade de Ferro II em g/l.

Para o banho agir eficientemente, o valor de referência máximo é 20 g/L e a quantidade de Fe^{2+} tem de ser menor que a de Fe^{3+} .

5.2.1.7. Ensaio de Ferro III

O ensaio de Ferro III tem como objetivo determinar a quantidade presente de Ferro III em g/L no banho ácido. Tal como no ensaio anterior, este ajuda a compreender se o banho age eficientemente. Uma quantidade superior de Ferro III ajuda a iniciar e potencia as reações que

ocorrem na decapagem. Este é o motivo pelo qual se adiciona algum banho no fim de vida num banho novo.

Os reagentes necessários para o ensaio de ferro III são: solução de cloreto de cálcio (10%), iodeto de potássio, solução de ácido clorídrico, solução de tiosulfato de sódio 0,1N, solução de amido 1%.

O procedimento experimental inicia com a preparação de uma solução de 10 ml da amostra ácida num balão volumétrico de 100ml, perfazendo-o com água desionizada. De seguida, 10 ml desta diluição é colocada num balão erlenmeyer de 300ml, adiciona-se-lhe 50 ml de água desionizada e 20 ml de cloreto de cálcio, e agita-se. Ao fim de 1 minuto adiciona-se 0,5g de iodeto de potássio, dissolvendo-o totalmente na solução. Posteriormente adiciona-se 50 ml de ácido clorídrico, agita-se e deixa-se repousar no escuro e devidamente fechada durante 15 minutos.

A titulação (Figura 5.5) é realizada com tiosulfato de sódio 0,1N até o ponto de viragem de castanho a amarelo, seguidamente adiciona-se gotas de solução de amido, ficando a solução azul escura. Volta-se a titular a solução até esta tornar a ficar incolor.

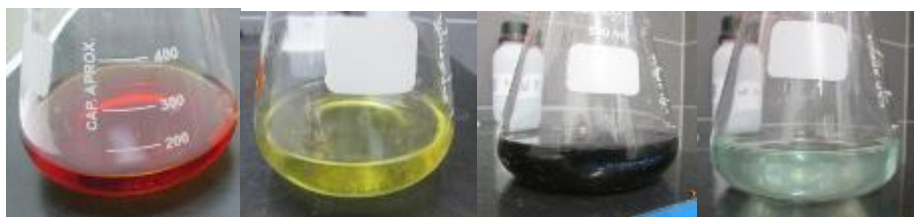


Figura 5.5 - Titulação com tiosulfato de sódio 0,1N.

Regista-se o valor consumido de tiosulfato de sódio (ml) e multiplica-se por 5,58, obtendo-se a quantidade de ferro III em g/l.

5.2.1.8. Ferro total

O Ferro total é a soma da quantidade de ferro II e de ferro III, sendo que o máximo admissível é de 100 g/l. Na Tabela 5.2 demonstra-se que à medida que a idade do banho aumenta, a quantidade de ferro total aumenta.

Tabela 5.2 - Idade do banho vs quantidade de Ferro total

Idade do banho	Quantidade de Ferro total (g/l)
Novo	10 a 30
Seminovo	30 a 70
Velho	>70
Limite de envelhecimento	>100

5.2.2. Microscopia ótica

A microscopia ótica tem como objetivo medir as espessuras das camadas de óxido de uma forma aproximada, para posteriormente correlacionar com o tempo de decapagem. O ensaio microscópico é realizado a cada tipo de aço inoxidável processado no setor da decapagem e com o equipamento Leica na ampliação de 10x. Para tal, é necessário uma preparação inicial das amostras, primeiramente são cortadas transversalmente as barras, com 1 ou 2 cm de altura de forma a possibilitar uma observação da camada de óxidos em toda a periferia da amostra. Em seguida, as amostras são retificadas e polidas. O respetivo polimento tem de ser feito com cuidado para não arredondar as arestas, caso contrário não é possível focar a camada de óxidos. Após o procedimento de preparação das amostras é possível realizar a análise microscópica.

Para comparar os resultados obtidos anteriormente com os tempos de decapagem é necessário analisar a superfície do aço inoxidável com diferentes tempos de imersão nos banhos ácidos, de modo a compreender a área de superfície oxidada que se remove ao longo do tempo de imersão. Salienta-se o facto de que é o excesso de tempo de imersão que provoca perdas de rendimento dos banhos ácidos na decapagem. Deste modo, realizou-se uma análise microscópica a cada tipo de aço inoxidável com o equipamento Leica na ampliação de 10x nos seguintes momentos: estado negro (antes de imergir no banho ácido); 30 minutos após a imersão da decapagem; 60 minutos após a imersão da decapagem; 90 minutos após a imersão da decapagem; 120 minutos (tempo máximo admitido para o fim da decapagem).

Após a análise microscópica da superfície do aço inoxidável, as amostras em todos os momentos são lavadas com um jato de água a 350 bar para compreender a área de óxidos que o jato remove da superfície e se após a lavagem esta fica completamente limpa de óxidos.

Para obter a área de superfície oxidada calcula-se a percentagem de óxido presente na superfície através do programa LAS V4.6 (Leica Application Suite) que trata as imagens recolhidas pelo microscópio Leica, analisa-as e distingue as zonas com óxido da superfície limpa na área analisada.

Nesta análise, as amostras têm um comprimento superior às anteriores, com cerca de 10 a 15 cm de forma a aproximar com a realidade. Mas é necessário ter em conta que as amostras de aço inoxidável são de menores dimensões que as barras de aço produzidas no processo de decapagem.

Com a análise microscópica, o objetivo final é saber os tempos essenciais e mínimos que cada tipo de aço necessita para ficar totalmente ileso de óxidos na sua superfície.

5.3. Produção

Nesta secção são encontradas as respetivas dependências do processo de decapagem, analisa-se os diferentes métodos de trabalho e tempos produtivos no setor, a capacidade de produção e o OEE dos banhos ácidos.

5.3.1. Diagrama de dependências

Para compreender a dependência do setor da decapagem no processo de fabrico de aço inoxidável realizou-se uma abordagem global do processo, referente ao mês de Março de 2015. O anexo G demonstra as taxas de ocupação dos diversos setores produtivos. O setor em foque, a decapagem obteve uma taxa de ocupação de 93,9%.

O aço em estado negro processado no setor da decapagem provém da laminagem (TA e TC) e do tratamento térmico (TT) prosseguindo maioritariamente para o desempenho. Deste modo, prevê-se que na decapagem as faltas de material semi-fabricado são reduzidas uma vez que no setor do desempenho existem duas máquinas a responder às necessidades do setor da decapagem.

Analisando a Figura 5.6, verifica-se que o setor da decapagem depende diretamente em 56% da capacidade produtiva da laminagem (TA+TT). Esta elevada dependência força a um planeamento da produção que evite a ocorrência de constrangimentos durante a produção.

Na Figura 5.7 analisa-se que os setores da embalagem e da reparação dependem da capacidade produtiva da decapagem, a reparação a 96% e a embalagem a 4%.

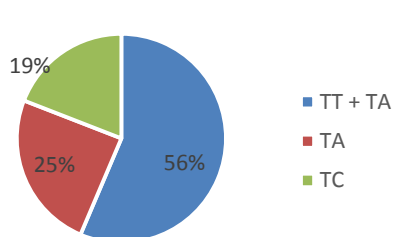


Figura 5.6 - Entradas do setor da decapagem.

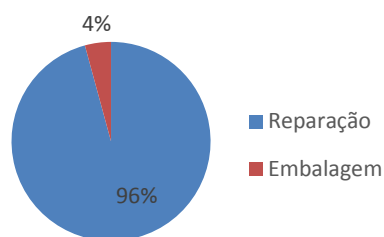


Figura 5.7 - Saídas do setor da decapagem.

5.3.2. Diagrama de Gantt

Atualmente o carregamento de cavaletes por dia alcança um número médio de 20 unidades, valor que pode ser aumentado com o plano ótimo de trabalhos.

Para elaborar um plano ótimo de trabalhos desenvolveu-se diagramas de Gantt com o objetivo de ilustrar os diferentes passos durante um turno de 8 horas, de uma forma organizada e otimizada. Portanto, realizou-se um diagrama de Gantt para cada turno de modo a compreender o melhor método de trabalho já utilizado e humanamente possível.

No início de cada turno existe um cavalete carregado com material e dois cavaletes imersos nos tanques da decapagem, um prontamente a ser removido do tanque e outro a meio do seu tempo de decapagem. Como tal, no final de cada turno é necessário organizar as tarefas de modo a alcançar o momento inicial ideal do próximo turno. No entanto, tem-se de ter em conta que existem fatores que influenciam na variabilidade dos tempos como, a qualidade dos banhos ácidos, o tipo de aço e a condição física dos colaboradores.

Os diagramas de Gantt elaborados encontram-se no Anexo H. Através de uma análise dos mesmos verifica-se que os tempos de decapagem são os que mais dificultam o aumento de produção, visto que a decapagem é o procedimento limitante. A ordem de trabalhos muda de turno para turno, no entanto não influencia drasticamente os valores mensais de produção como se pode verificar na Tabela 5.3. Analisando a Tabela 5.3, verifica-se que os diferentes turnos produzem aproximadamente o mesmo, pelo facto de se utilizar a regra do carregamento dos cavaletes (3 toneladas/cavalete). Contudo, destaca-se o turno A e D com valores de toneladas/dia superiores aos valores obtidos pelos restantes turnos.

Tabela 5.3 - Toneladas e barras produzidas num mês por cada turno.

Turno	Toneladas	Barras	Dias produtivos	Toneladas/dia
A	392	8986	25	15,68
B	288	8601	21	13,71
C	314	7716	23	13,65
D	346	8760	22	15,73

5.3.3. Tempo de produção

O tempo de produção é um dos principais fatores para a compreensão e otimização do processo de decapagem. Quando o tempo dispendido em determinadas tarefas é excessivo, podem gerar-se atrasos na entrega de material decapado ao próximo setor de produção. Em seguida apresenta-se a Tabela 5.4 com os tempos médios das principais operações do processo (no decurso de uma semana). Observando a Tabela 5.4, verifica-se que o procedimento

Otimização do processo de decapagem química numa empresa de produção de perfis de aço

limitante no processo é a decapagem do aço inoxidável. Por este motivo torna-se interessante otimizar os tempos de decapagem.

Tabela 5.4 - Tempos médios das principais operações do setor da decapagem.

Operações principais	Carga	Decapagem	Borbulhação	Lavagem	Secagem	Descarga	Total
Tempo médio (minutos)	13,3	125	29,9	7,7	33,4	5,7	215

5.3.4. Capacidade de produção

A evolução da produção no presente ano tem vindo a aumentar, constatando-se a necessidade de aumentar o tempo produtivo para responder às necessidades dos clientes. Consequentemente, o tempo de vida dos banhos que permanecia entre 35 a 65 dias, encontra-se este ano (implementação da laboração contínua) entre os 31 e os 35 dias produtivos.

Deste modo, a análise da capacidade de produção será realizada a partir do mês de Fevereiro de 2015, uma vez que nesta data o tempo de produção aumentou através da mudança de operação laboral de 3 turnos para 4 turnos. Doravante passa-se a considerar que as condições de operação são as mesmas.

A capacidade produtiva do setor da decapagem depende da eficiência dos banhos em decapar com rapidez o aço inoxidável, motivo pelo qual se fez uma análise banho a banho.

Na Tabela 5.5 apresenta-se dados para dois exemplos de banhos. Analisando os valores indicados verifica-se que o banho 3-15 com 35 dias (mais duradouro) corresponde a aproximadamente 738 toneladas e a 34 895 metros quadrados de aço decapado. Em média, num dia produz-se cerca de 21 a 24 toneladas que correspondem a cerca de 1010 a 1040 metros quadrados de superfície de aço a tratar.

Tabela 5.5 - Dias produtivos dos banhos, número de barras, peso e área superficial dos aços decapados.

Banho	Dias produtivos	Nº barras	Peso (Ton)	Área superficial (m²)
2-15	31	20 537	735	30 966
3-15	35	22 596	738	34 895

Na Figura 5.8 e Figura 5.9 está representado o número de toneladas por dia durante o tempo de vida de cada banho.

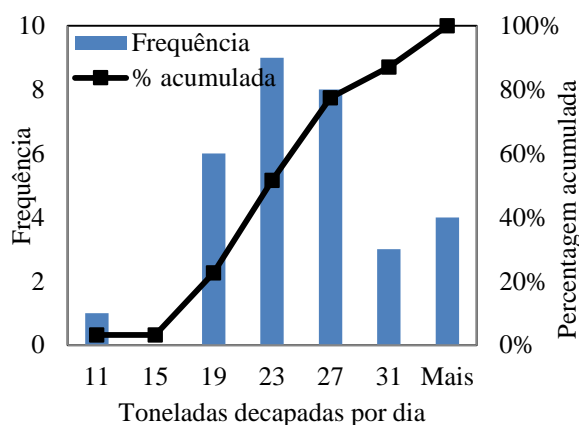


Figura 5.8 - Toneladas decapadas por dia relativamente ao banho 2-15.

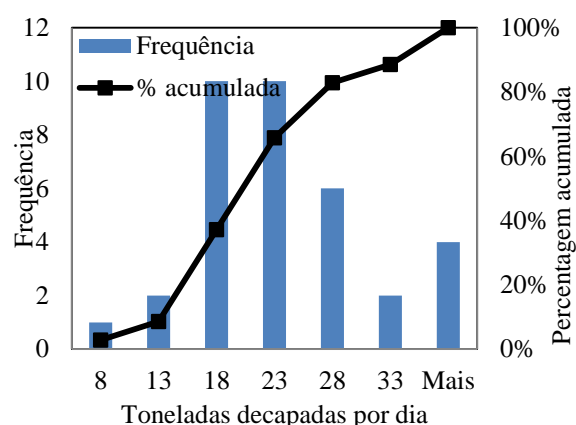


Figura 5.9 - Toneladas decapadas por dia relativamente ao banho 3-15

Analisando as figuras anteriores verifica-se que a maior frequência de toneladas decapadas por dia encontra-se entre as 18 e as 23 toneladas. Isso significa que a capacidade de produção encontra-se aproximadamente abaixo da média produtiva (23 ton/dia com um desvio-padrão 7), sendo possível produzir mais por dia.

Nos banhos da decapagem são colocados em imersão diferentes tipos de aço, maioritariamente pertencentes à família dos aços austeníticos, com as seguintes designações de qualidade: 1.4307, 1.4571, 1.4404, 1.4542, 1.4305 e 1.4841. Nas Figura 5.10 e Figura 5.11, são apresentadas as percentagens das qualidades de aço inoxidável decapados nos dois banhos em análise.

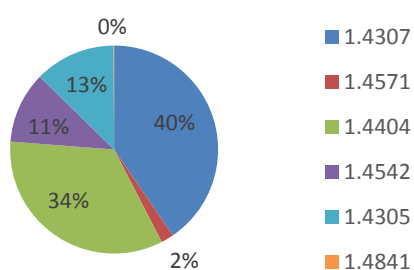


Figura 5.10 - Percentagens das quantidades das qualidades de aços decapados pelo banho 2-15.

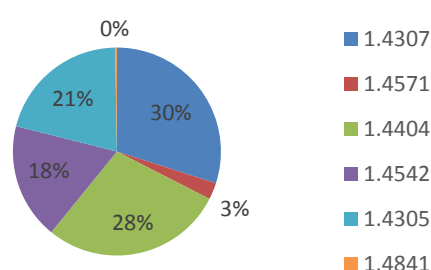


Figura 5.11 - Percentagens das quantidades das qualidades de aços decapados pelo banho 3-15.

Nas Figura 5.10 e Figura 5.11 conclui-se que a qualidade 1.4307 e seguidamente a qualidade 1.4404 são as mais processadas no setor da decapagem.

As capacidades de produção obtidas nos banhos referidos só são possíveis adicionando ácidos ao longo do tempo, o que traz custos de produção elevados.

Consumo de ácido

Na fase seguinte deste estudo, analisou-se as quantidades de ácidos consumidos em cada banho. No banho 2-15 consumiu-se 43% de Surtec A (peróxido de hidrogénio), 49% de Surtec NB (ácido fluorídrico) e 8% de ácido sulfúrico. No banho 3-15 consumiu-se 49% de Surtec A, 31% de Surtec NB e 20% de ácido sulfúrico. Analisando as percentagens referidas anteriormente, verifica-se que o ácido mais consumido é o peróxido de hidrogénio (Surtec A) e o ácido fluorídrico (Surtec NB). No entanto, os custos que estão associados a cada banho contemplam os ácidos consumidos e os custos das limpezas cujos valores estão apresentados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Custos de produção dos banhos em estudo (€).

Banho	Surtec A	Surtec NB	H ₂ SO ₄	Custo Limpezas	Total
2-15	4 239	8 204	223	2 780	15 446
3-15	6 485	7 016	754	2 816	17 070

Com o intuito de compreender os custos dos banhos por aço decapado são elaborados diferentes indicadores económicos (Tabela 5.7).

Tabela 5.7 - Indicadores económicos nos banhos em estudo.

Banho	€/ Toneladas	€/m ²	€/ N° barras
2-15	21,02	0,5	0,75
3-15	23,12	0,49	0,76

Na Tabela 5.7 dos indicadores económicos, verifica-se que o banho 3-15 obteve custos de produção mais elevados que o banho 2-15. No entanto, estes dois banhos produziram aproximadamente as mesmas toneladas o que nos remete para um excesso de adição de ácidos no banho 3-15.

5.3.5. OEE - (*Overall Equipment Effectiveness*)

Para o cálculo do OEE no setor da decapagem, são utilizados os dados relativos aos banhos em estudo, apresentados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Dados relativos aos banhos 2-15 e 3-15 para o cálculo do OEE.

Dados	Banho 2-15	Banho 3-15
Tempo de vida de um banho (dias)	31	35
Tempo programado (dias)	29	33
Tempo total produtivo dos atados no banho (minutos)	93 042	95 796
Tempo excessivo e tempo 2ª decapagem (minutos)	37 777	30 381
Tempo disponível para produção (dias)	27	31
Média dos m ² decapados por banho	30 966	34 894
Média dos m ² decapados pela 2ª vez por banho	2 115	2 696
m ² não decapados pela 2ª vez	28851	32198

O cálculo de OEE é determinado pelo produto do indicador de desempenho, disponibilidade operacional e taxa de qualidade, como se demonstra nas seguintes equações:

$$\text{OEE} = \text{Indicador de desempenho} \times \text{Disponibilidade operacional} \times \text{Taxa de qualidade} \quad (5.1)$$

$$\text{Disponibilidade operacional} = \frac{\text{Tempo disponível para produção}}{\text{Tempo programado}} \quad (5.2)$$

$$\text{Indicador de desempenho} = \frac{\text{Tempo não excessivo} + \text{Tempo sem 2ª decapagem}}{\text{Tempo produtivo do banho}} \quad (5.3)$$

$$\text{Taxa de qualidade} = \frac{\text{m}^2 \text{ não decapados pela 2ª vez}}{\text{Média dos m}^2 \text{ decapados por banho}} \quad (5.4)$$

Atualmente pretende-se que a disponibilidade operacional seja superior a 90%, o indicador de desempenho superior a 95% e a taxa de qualidade superior a 99%, tendo como objetivo um OEE superior a 85%. Os resultados para os dois banhos são apresentados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 - Resultados dos cálculos de OEE.

	Banho 2-15	Banho 3-15
Indicador de desempenho (%)	59	68
Disponibilidade operacional (%)	93	94
Taxa de qualidade (%)	93	92
OEE (%)	51	59

Verifica-se assim que a eficácia global dos banhos é relativamente baixa, aproximadamente 55%, comparativamente ao valor considerado como meta (85%). Contudo, a nível industrial um OEE de 60% é ótimo, o que significa que o banho 3-15 esteve próximo desse valor.

5.4. Nível Sigma

A performance dos banhos anteriormente analisados são medidos através do cálculo do nível sigma. O nível sigma sugere que quanto maior for a qualidade do produto, maior o nível sigma. Nos banhos são imersos diferentes tipos de aço inoxidável e cada um deles tem o seu tempo ótimo para decapar eficazmente. Por este motivo, analisa-se o tempo de imersão de um atado no banho. Realiza-se uma análise estatística, avaliando a média, o desvio padrão e a frequência, com o objetivo de perceber o tempo atual de cada aço no respetivo banho.

O DPMO diz respeito aos defeitos por milhão de oportunidades, em que as oportunidades correspondem ao valor potencial de defeitos. Neste caso considerou-se que o número de atados do mesmo tipo de aço inoxidável que permanecer imerso mais tempo que a frequência normal corresponde a defeito.

Os dados relevantes para o cálculo de DPMO para cada banho estão organizados nas Tabela 5.10 e Tabela 5.11, respetivamente para o banho 2-15 e o banho 3-15.

Tabela 5.10 - Resultados do cálculo de DPMO (qualidades mais processadas) no banho 2-15.

Qualidades	Rendimento (%)	Nº atados com defeito	DPMO
4307	52	155	481366
4571	50	9	500000
4404	61	84	392523
4542	68	23	319444
4305	74	27	264706

No banho 2-15, os DPMO para cada tipo de aço são elevados. Realizando uma aproximação global ao banho obtém-se os seguintes valores médios: DPMO de 398 929 com um rendimento de 60%. Os dados recolhidos mostram que o banho 2-15 aponta para um nível sigma de 1,76.

Tabela 5.11 - Resultados do cálculo de DPMO (qualidades mais processadas) no banho 3-15.

Qualidades	Rendimento (%)	Nº atados com defeito	DPMO
4307	72	69	277108
4571	61	9	391304
4404	79	38	205405
4542	66	42	336000
4305	66	51	335526

No banho 3-15, os DPMO para cada tipo de aço são elevados. Realizando uma aproximação global ao banho obtém-se os seguintes valores: DPMO de 260 924 com um rendimento de 74%. Os dados recolhidos mostram que o banho 3-15 aponta para um nível sigma de 2,14.

6. FASE ANALISAR

Na etapa Analisar é apresentado um diagrama de Ishikawa (secção 6.1) de modo a auxiliar a análise química e microscópica ótica realizada nas subsecções 6.2.1 e 6.2.2.

6.1. Diagrama de Ishikawa

O diagrama de Ishikawa é uma ferramenta que permite identificar potenciais causas de um determinado problema. Segundo Gupta et al. (2012), esta ferramenta gráfica elimina as causas do problema e estabelece inter-relações entre diferentes causas.

Deste modo, constitui-se uma equipa multidisciplinar (técnicos e colaboradores do setor) para o desenvolvimento de um diagrama causa-efeito com o objetivo de identificar os fatores que influenciam o aumento de tempo da decapagem.

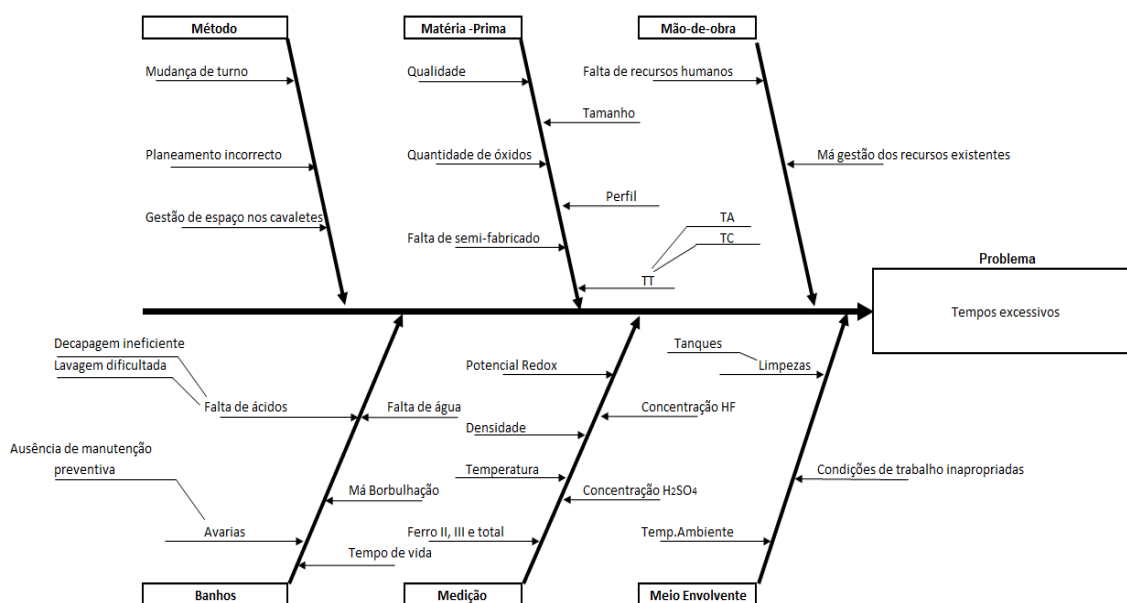


Figura 6.1 - Diagrama de Ishikawa

Com a análise do diagrama de Ishikawa apresentado na Figura 6.1, pode-se concluir que existem vários fatores que influenciam o aumento dos tempos da decapagem. Um dos fatores preponderantes é o envelhecimento do banho de decapagem que provoca oscilações dos níveis de concentração e do potencial redox. Por conseguinte, verifica-se um aumento do tempo de decapagem. Outro fator é o conjunto dos resultados das medições, que nem sempre são reais devido ao facto de existir um parâmetro fora da gama ideal que influencia todos os outros. Este facto salienta a importância de verificar o que sucede quando se realiza uma adição corretiva.

A qualidade do aço também é um fator importante visto que, dependendo da qualidade do aço, este pode permanecer mais tempo ou menos no tanque de decapagem. Em seguida são analisados os fatores anteriores, os banhos e as adições corretivas e os tempos de decapagem, com análises químicas e com microscopias óticas à superfície do aço inoxidável ao longo do tempo de decapagem. Relativamente à mão-de-obra e ao método de trabalho, estes serão analisados com os diagramas de Gantt anteriormente realizados que resultará posteriormente num novo plano de trabalhos, já na fase Melhorar. No meio envolvente só irão ser apresentadas propostas de melhoria.

6.2. Apresentação e Discussão de Resultados

6.2.1. Análises químicas

Nesta subsecção são apresentados estudos a cada parâmetro químico após adições dos diferentes ácidos e do peróxido de hidrogénio (potencial redox), a quantidade de ferro ao longo da vida do banho e a durabilidade do banho ácido.

6.2.1.1. Estudo do Potencial Redox

O potencial de Oxidação-Redução é um parâmetro químico importante no processo de decapagem devido à sua influência nos outros parâmetros, principalmente na concentração de ácido fluorídrico.

O valor do Potencial Redox é considerado ideal para o banho ácido quando este permanece acima 300 mV. Segundo Böllinghaus (2014), quando o valor de potencial redox é inferior, as leituras da concentração de ácido fluorídrico não correspondem à realidade (valor superior), como se observa na Figura 6.3.

Adição de 100 litros de peróxido de hidrogénio

Observando a Figura 6.3, verifica-se que o valor da concentração de ácido fluorídrico é influenciado pelo potencial redox. No primeiro momento de medição, o valor de potencial redox era baixo (300 mV) e o valor de concentração de ácido fluorídrico era elevado (54,5 g/L). Após a adição de peróxido de hidrogénio, o valor de concentração de ácido fluorídrico diminui para as 50,8 g/L. Quando o potencial redox atinge o valor mais elevado após uma adição de 100 L, o valor da concentração de ácido fluorídrico assume o valor de 52,3 g/L. Deste modo, conclui-se que é relevante manter sempre o valor do potencial redox para que o valor de concentração de ácido fluorídrico corresponda à realidade.

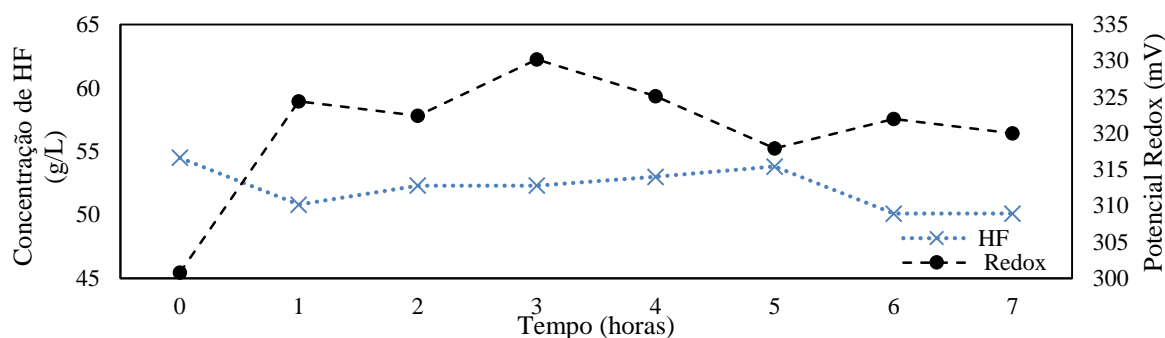


Figura 6.3 - Representação da variação do potencial redox e da concentração do ácido fluorídrico após uma de adição 100 litros de peróxido de hidrogénio.

Segundo Böllinghaus (2014), quando o valor de potencial redox é muito elevado, ocorre um consumo elevado de ácido fluorídrico. Na Figura 6.2 está representada uma adição de 100 litros de peróxido de hidrogénio em que o valor do potencial redox já se encontra elevado.

Na Figura 6.2 analisa-se que o valor de potencial redox elevado influencia no valor de concentração de ácido fluorídrico, provocando uma diminuição. Contudo, após 6 horas da adição de peróxido os valores estabilizam e na realidade não ocorre um consumo de ácido fluorídrico.

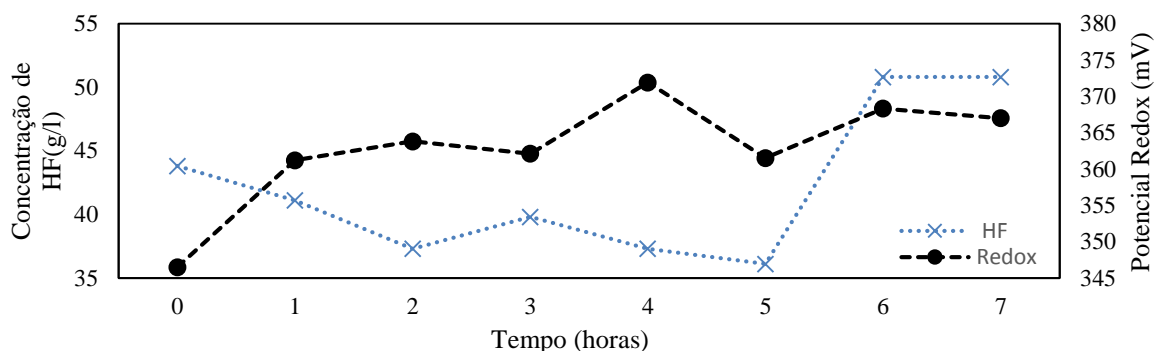


Figura 6.2 - Representação da variação do potencial Redox e da concentração do ácido fluorídrico após uma de adição 100 litros de peróxido de hidrogénio.

Relativamente à variabilidade da concentração de ácido sulfúrico perante a variação do potencial redox, esta é analisada na Figura 6.4 onde se verifica que o valor de concentração de ácido sulfúrico aumenta consoante o aumento do potencial redox. No entanto, o aumento da concentração não é significativo. No momento em que o potencial redox estabiliza, o valor da concentração de ácido sulfúrico volta ao valor antes da adição de peróxido de hidrogénio.

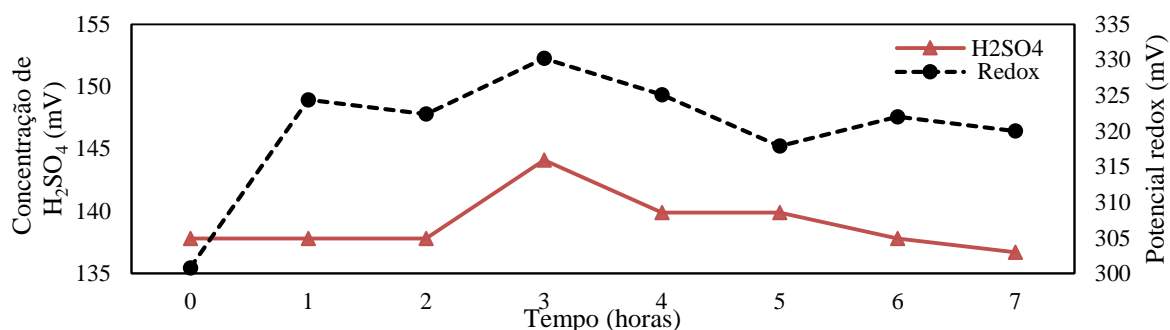


Figura 6.4 - Representação da variação do potencial Redox e da concentração do ácido sulfúrico após uma adição de 100 litros de peróxido de hidrogénio.

O parâmetro pH é considerado importante no processo de decapagem por representar a influência que tem sobre o equilíbrio entre as substâncias presentes nos banhos ácidos, ou seja, à medida que o potencial redox aumenta, verifica-se um aumento do pH da solução como se encontra evidenciado na Figura 6.5. Isto sucede com a adição de peróxido de hidrogénio que provoca um aumento do potencial redox e o pH da solução torna-se menos ácido.

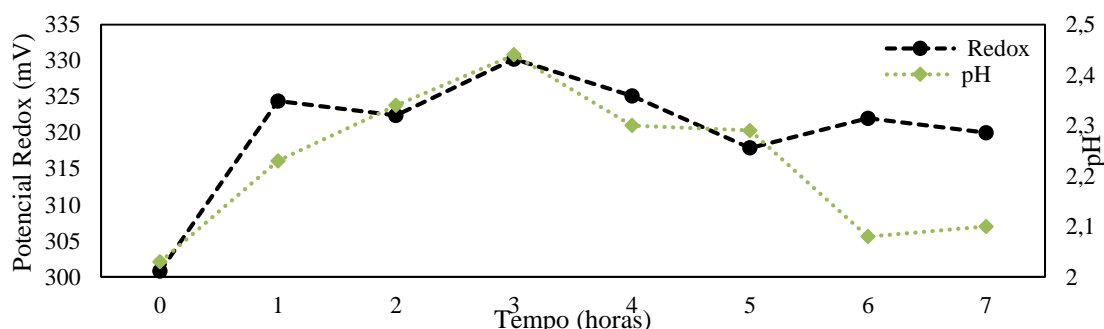


Figura 6.5 - Representação da variação do potencial Redox e do pH após uma adição 100 litros de peróxido de hidrogénio.

O consumo de peróxido de hidrogénio relaciona-se com o facto do banho ácido estar instável quimicamente. No início de vida do banho, este consome mais peróxido de hidrogénio pelo facto de que a concentração de Fe³⁺ não ser suficiente para realizar o processo de decapagem de forma eficiente, continuando a consumir este reagente até alcançar a estabilidade química. Normalmente esta estabilidade é atingida nos primeiros dez dias de vida. A partir deste momento, a introdução de peróxido de hidrogénio é normalmente feita apenas para manter o valor de potencial redox acima do valor de referência. Quando o banho tem uma densidade superior a 1,3 g/cm³, o potencial redox tem tendência a diminuir facilmente devido ao valor do Ferro III voltar a baixar de forma drástica e o banho torna a consumir mais peróxido de hidrogénio.

Outro fator que provoca uma diminuição no potencial redox é a decapagem de uma quantidade da qualidade 1.4305 (AISI 303) superior a 7% da quantidade total de aço tratada por dia, como se pode observar na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Valores dos parâmetros principais da decapagem nos dias 25 e 26 de Maio de 2015.

Dia	Potencial Redox (mV)	HF (g/L)	H₂SO₄ (g/L)
25 - 05 - 2015	269	37,9	136,7
26 - 05 - 2015	254	69,9	143,1

Verifica-se que no dia 25-05-2015, foram efetuadas as correções necessárias no ajuste das concentrações para os parâmetros desejados, no entanto, passadas 24 h o valor do potencial redox ainda se mantinha abaixo do desejado. Uma parte do consumo do peróxido foi relativo às outras adições e outra parte foi relativo à decapagem de cerca de 23% do aço 1.4305.

6.2.1.2. Estudo das concentrações do ácido fluorídrico e do sulfúrico

As concentrações de ácido fluorídrico e sulfúrico variam consoante o tempo de vida e utilização do banho, o tipo de aço a ser decapado, e as adições de todos os ácidos presentes. Em seguida estuda-se as variações das concentrações dos ácidos e potencial redox após adições destes ácidos.

A gama de valores de referência é de 140 a 160 g/L de ácido sulfúrico. Caso o valor obtido esteja fora da gama de valores analisa-se qual a ação para o valor ficar dentro da gama. Se a concentração do ácido sulfúrico estiver em excesso, este inibe a ação do ácido fluorídrico no banho ácido e para voltar à gama de concentrações desejada dilui-se o banho. Se a concentração do ácido sulfúrico estiver inferior à gama de referência, ocorre um consumo excessivo de ácido fluorídrico, com uma conseqüente falta de acidez do banho e um aumento do tempo da decapagem. A solução será adicionar ácido sulfúrico. Estudos anteriores realizados na empresa concluíram que a cada 100 litros de ácido sulfúrico a concentração sobe cerca de 16 g/L.

Adição de 100 litros de ácido sulfúrico

Analisando a Figura 6.6 verifica-se que após 6 horas da adição o valor de concentração de sulfúrico atingiu o valor máximo, com uma diferença de cerca de 19,4 g/L relativamente ao valor inicial. O valor de concentração de ácido fluorídrico sobe cerca de 7,6g/L, o que significa que uma concentração de sulfúrico baixa influencia o valor da concentração de fluorídrico.

Após este momento os valores de concentração estabilizam. Relativamente ao valor do potencial redox, este baixa à medida que o ácido sulfúrico reage e que se decapa material.

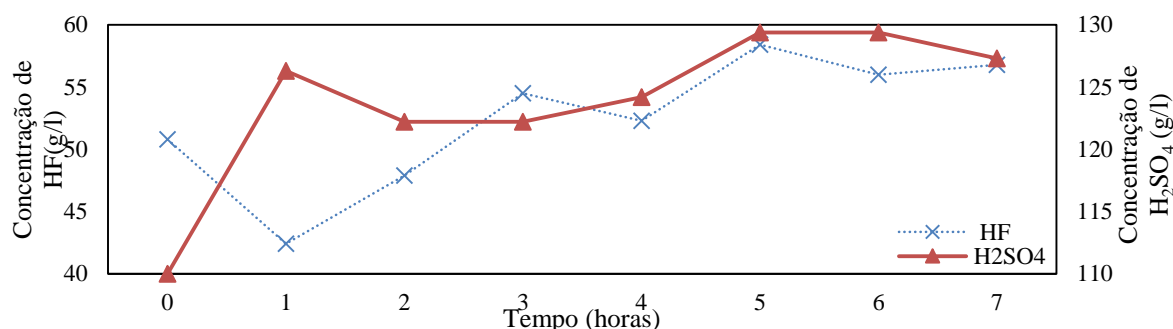


Figura 6.6 - Representação da variação de ácido fluorídrico e sulfúrico após uma adição de 100 litros de ácido sulfúrico

Relativamente à concentração de ácido fluorídrico, a gama de valores de referência é de 40 a 60 g/L, e caso o valor obtido esteja fora da gama de valores analisa-se qual a ação para o valor ficar dentro da gama. Quando o valor de concentração é inferior à gama de referência ocorre um aumento do tempo de decapagem. A solução passa por adicionar ácido fluorídrico. Em estudos anteriores na empresa, concluiu-se que por cada 100 litros de ácido fluorídrico o valor da concentração sobe cerca de 4 g/L. Quando o valor de concentração é muito elevado, aumenta a quantidade de ferro total e poderá ocorrer uma sobredecapagem no banho. A solução destes problemas é a diluição do banho. No entanto, quando o valor de concentração é muito elevado e ocorre um consumo elevado de ácido fluorídrico, a ação é diminuir a dosagem do mesmo.

Adição de 100 litros de ácido fluorídrico

A Figura 6.7 apresenta um aumento da concentração de ácido fluorídrico de 6,9 g/L após 5 horas da adição, no entanto a partir deste momento o valor de concentração volta a decrescer. Relativamente ao ácido sulfúrico verifica-se que nas primeiras horas após a adição, o valor da concentração tem tendência a diminuir, observando-se um aumento deste à medida que o ácido fluorídrico reage no banho, aumentando 5,5g/L. No entanto, o potencial redox diminui após a adição de ácido fluorídrico, podendo diminuir até cerca de 26mV.

Conclui-se que após uma adição de ácido fluorídrico ou sulfúrico, o valor da concentração do ácido não adicionado também aumenta.

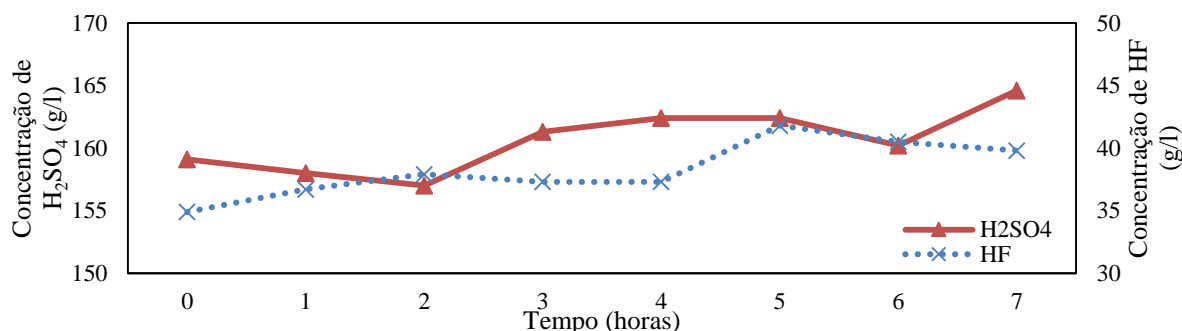


Figura 6.7 - Representação da variação de ácido fluorídrico e sulfúrico após uma adição de 100 litros de ácido fluorídrico.

Adição de 50 litros de ácido fluorídrico e de 50 litros de ácido sulfúrico

A adição de ácido fluorídrico e sulfúrico em quantidades iguais ou inferiores a 50 L não resultam num aumento significativo dos valores de concentração, como se pode observar na Figura 6.8.

No caso analisado na Figura 6.8, a concentração de ácido fluorídrico aumenta no máximo cerca de 1,8g/L e só mantém o valor acima do inicial durante 4 horas após a adição. Por isso mesmo, não se justifica uma adição de 50 L. Em relação à concentração de ácido sulfúrico esta aumenta cerca de 8 g/L até ao valor esperado. No entanto, embora o valor diminua rapidamente este mantém-se acima do valor inicial com cerca de 5,4 g/L de diferença. Esta diminuição deve-se ao facto das medições serem todas realizadas ao longo do tempo de produção, porque existem alguns tipos de aço que consomem mais que os outros, como por exemplo, o aço 1.4305.

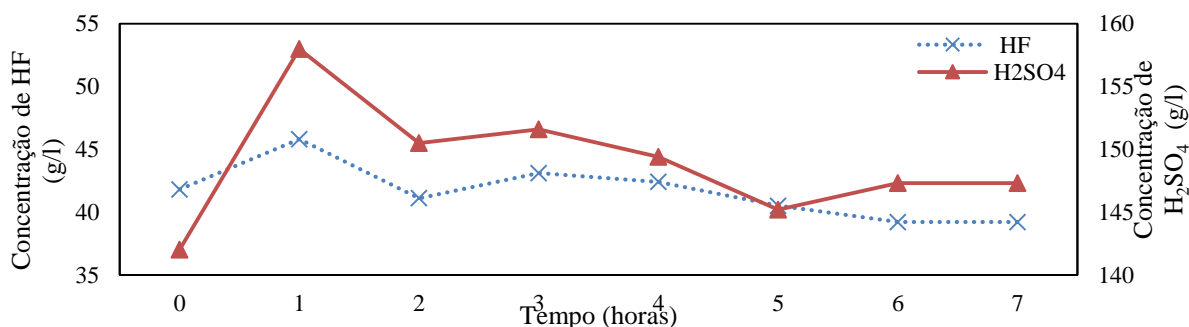


Figura 6.8 - Representação da variação da concentração do ácido fluorídrico e da concentração do ácido sulfúrico após uma adição 50 L de cada.

6.2.1.3. Estudo da presença de Ferro total

A quantidade de Ferro total, Ferro II e Ferro III presente no banho ácido aumenta ao longo do tempo. No entanto existe exceções, quando são realizadas diluições as quantidades de Ferro III e total diminuem. Na Figura 6.9 está representado um banho ácido (banho 4-15) sem diluições consideráveis e na Figura 6.10 está representado um banho ácido (5-15) com diluições bastantes significativas.

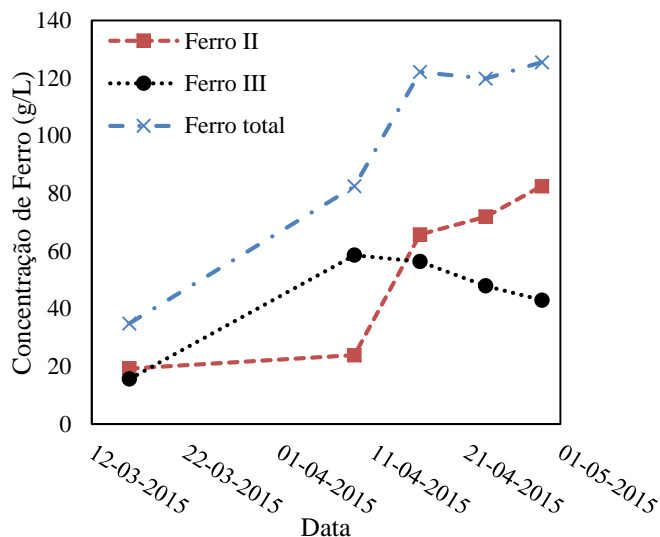


Figura 6.9 - Representação das quantidades de ferro ao longo do tempo de vida do banho 4-15.

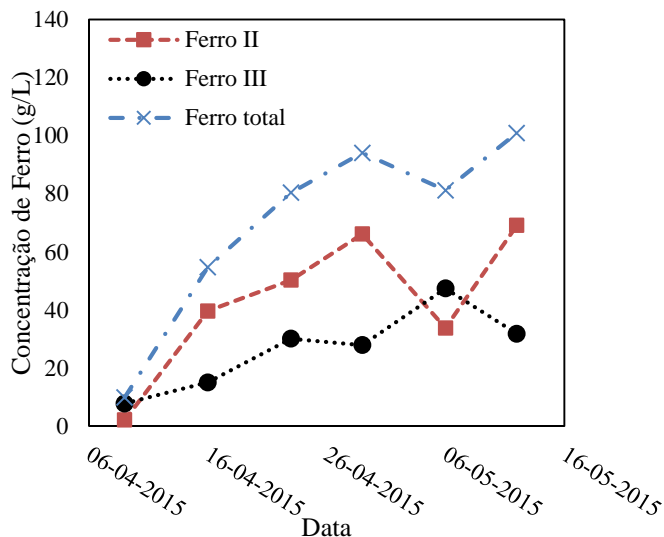


Figura 6.10 - Representação das quantidades de ferro ao longo do tempo de vida do banho 5-15.

Através da análise da Figura 6.10 verifica-se que, no início de vida do banho, a quantidade de Ferro III é superior à quantidade de Ferro II devido à introdução de 7% de banho ativo. No banho 4-15 não se verificou o mesmo, mas a primeira medição de Ferro não foi no dia após a formação do banho como no banho 5-15, o que poderá justificar os resultados. Ao longo da vida do banho a concentração de ferro aumenta. No entanto, se ocorrer diluições, como no caso apresentado no banho 5-15 no dia 6 de Maio, a quantidade de Ferro II diminui. Comparando os dois banhos, compreende-se que realizar diluições não contribuiu significativamente para o aumento de vida do banho, sendo que o banho 5-15 durou 42 dias e o banho 4-15 durou 53 dias.

No fim de vida de um banho, a quantidade de Ferro II é superior à quantidade de Ferro III. Por observação diária verifica-se que a partir deste momento o banho ácido não remove eficientemente a camada de óxidos na superfície dos materiais imergidos.

Durante esta análise também se verificou que o Ferro II aumenta de forma rápida quando o valor de concentração de ácido sulfúrico é relativamente baixo, como se pode observar na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Resultados semanais no banho 4-15.

Medições	Ferro II (g/L)	Ferro III (g/L)	Ferro total (g/L)	Média de HF (g/L)	Média de H ₂ SO ₄ (g/L)
1 ^a	19	16	35	49	155
2 ^a	24	59	82	48	140
3 ^a	66	56	122	44	135
4 ^a	72	48	120	48	137
5 ^a	83	43	125	37	149

Na terceira medição verifica-se que o Ferro II aumentou cerca de 47g/L e a concentração de ácido sulfúrico entre a 3^a e a 4^a medição ficou sempre abaixo dos valores de referência. Isto deve-se ao facto da função do ácido sulfúrico, que é promover a dissolução das camadas de óxido, estar minimizada devido à baixa concentração de ácido sulfúrico. Na 3^a medição também é possível constatar que a reação de oxidação (4.7) não está a ocorrer uma vez que, por observação o material não é decapado. Quando o valor de ferro II é elevado (exemplo, 66 g/L), é necessário realizar uma diluição de forma a ajudar na reatividade dos ácidos no banho.

Quando a concentração de Ferro total é superior a 100g/L, uma adição de ácido sulfúrico no banho ácido não é relevante porque este não reage consideravelmente e o aumento da concentração é mínimo. Quando a concentração de Ferro total é superior a 120 g/L, todas as adições realizadas ao banho são inúteis pois as concentrações e o potencial redox não sobem significativamente.

6.2.1.4. Durabilidade do Banho

A solução ácida permanece num tanque fechado sem qualquer sistema de recirculação, de remoção das lamas e de recuperação dos ácidos, o que provoca uma acumulação de lamas ao longo do tempo e um elevado consumo dos ácidos. Ao longo da utilização do banho ácido, a densidade aumenta gradualmente. No entanto, pode haver diluições que causam diminuições da densidade.

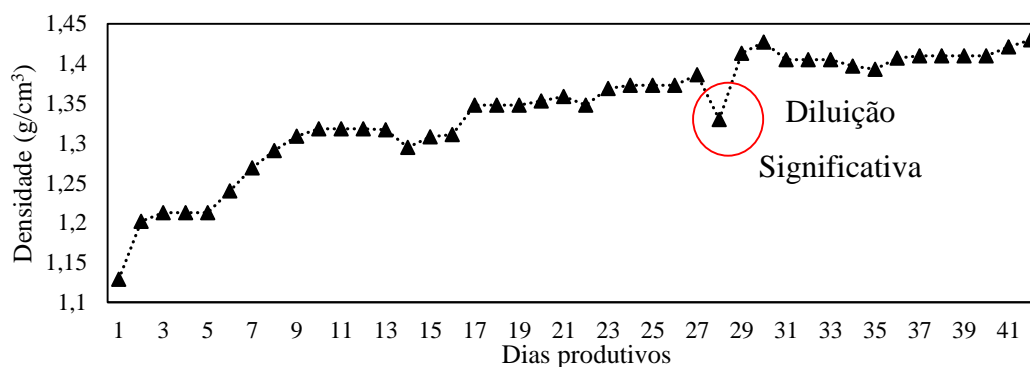


Figura 6.11 - Densidade ao longo do tempo de vida do banho ácido.

Observando o exemplo apresentado na Figura 6.11, verifica-se que ao longo do tempo de vida do banho ocorreram várias diluições, que provocaram diminuições de densidade, não aumentando significativamente a longevidade do banho. Face a um banho sem diluições significativas (banho 4-15) concluiu-se que o banho 5-15 teve menos 11 dias de vida. No entanto, os ácidos consumidos e os custos relativos a estes por dia são aproximados, como se pode observar na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 - Análise das quantidades de ácidos consumidos e seus respectivos custos.

Banho	Dias produtivos	Ácidos (Litros)	Ácidos (€)	Litros/dia	€/dia
4-15	53	11918	16707	315	225
5-15	42	9530	13901	331	227

A adição de água significativa não foi rentável a nível económico, embora que as diluições são necessárias para diminuir a densidade. Mas se forem adicionados ácidos e estes não reagirem, a diluição ajudará a impulsionar as reações na decapagem.

Durante o tempo de análise verificou-se que é viável uma pequena diluição do banho ácido, quando este tem a concentração de Ferro II superior a 65 g/L e a concentração de Ferro III superior a 30 g/L. Neste momento, o banho ácido tem aproximadamente 100 g/L, e desta forma alcança-se um prolongamento da vida do banho.

6.2.2. Avaliação da camada de óxido através da microscopia ótica

A microscopia ótica no limite de uma aresta do perfil do aço inoxidável tem como objetivo analisar a espessura da camada de óxido, de modo a compreender as diferenças nos tempos de decapagem entre os tipos de aço. Foram analisados os aços mais processados na decapagem, tal como os aços 1.4542, 1.4404, 1.4571, 1.4305 e 1.4307. No entanto, não foram considerados os vários perfis e dimensões que são produzidos na empresa Böllinghaus. Na

Tabela 6.4 apresentam-se os resultados das medições da espessura da camada de óxidos através da microscopia ótica.

Tabela 6.4 - Espessura da camada de óxidos (μm) em cada tipo de aço.

Aço		Espessura (μm)	
AISI	EN	TC	TA
303	1.4305	12,6	28,5
304 L	1.4307	19,4	33,3
316 L	1.4404	8,5	44
316 Ti	1.4571	12,3	12
630	1.4542	20,5	42,9

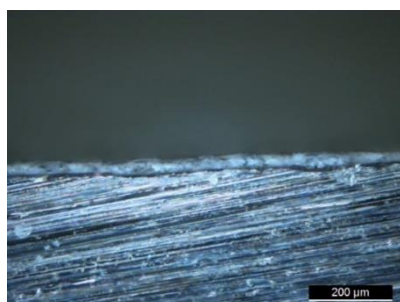


Figura 6.12 - Imagem microscópica do aço 1.4404 proveniente de TA.

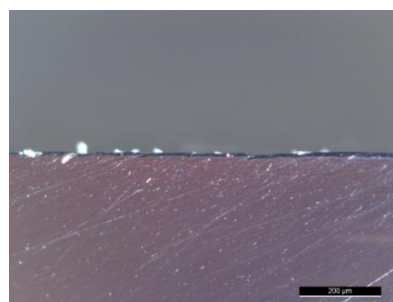


Figura 6.13 - Imagem microscópica do aço 1.4404 proveniente de TC (com contraste diferente).

Verifica-se que a espessura da camada de óxido é superior no aço proveniente de TA do que no aço proveniente de TC, tal como é observado na Figura 6.12 e Figura 6.13, respetivamente. Isto sucede devido à reação com oxigénio na laminagem de TA demorar mais tempo. Contudo, a espessura da camada de óxido do aço 1.4571 proveniente de ambos os trens (TA e TC) é muito semelhante (ver Tabela 6.4). Uma explicação plausível para esta observação reside no composto titânio presente neste tipo de aço, que poderá influenciar a taxa de crescimento da espessura da camada de óxido.

Efeito do tempo de imersão

Recorreu-se também à microscopia ótica para estudar a superfície do aço inoxidável com diferentes tempos de imersão nos banhos ácidos, de modo a compreender a área de superfície com óxidos que se remove ao longo do tempo de imersão e a conhecer os tempos mínimos da decapagem para cada tipo de aço. No entanto tem-se de ter em conta que a extrapolação para o nível produtivo deve ser feita com algum cuidado, pois os ensaios de análise foram realizados com amostras de vários perfis e não com barras de dimensões típicas da produção. Na Figura 6.14 é apresentada a imagem da superfície de uma amostra de aço 1.4404 que está imerso no banho ácido durante 30 minutos. A imagem na Figura 6.15 resulta do

processamento da imagem original (Figura 6.14) através do programa informático LAS V4.6, que permite calcular automaticamente a percentagem da superfície que permanece oxidada (Figura 6.16).

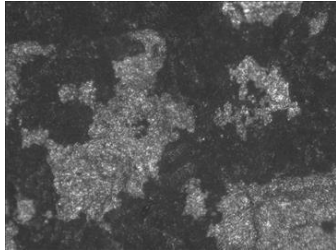


Figura 6.14 - Imagem microscópica do aço 1.4404 com 30 minutos na decapagem.

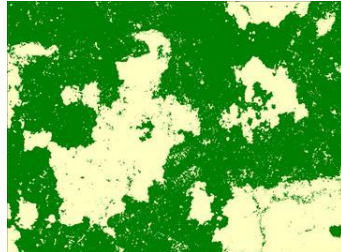


Figura 6.15 - Imagem microscópica do aço 1.4404 com 30 minutos na decapagem com o tratamento realizado pelo programa LAS V4.6.

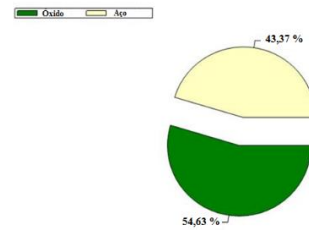


Figura 6.16 - Resultados obtidos através do programa LAS V4.6.

É de referir que no fim da decapagem e da lavagem a jato, os aços encontram-se praticamente isentos de óxidos na sua superfície. Na Figura 6.17 são apresentadas as imagens da superfície de um aço 1.4404 proveniente de TC, antes do banho, após o banho e após a lavagem a jato para tempos de imersão de 30, 60, 90 e 120 minutos. As imagens resultantes do tratamento destas imagens com o programa LAS V4.6, bem como a correspondente quantificação da área da superfície oxidada, são apresentadas na Figura 6.18. Na Figura 6.17, as zonas escuras são os óxidos visíveis e as zonas castanhas avermelhadas aparecem devido ao contacto da água com os óxidos ainda presentes na superfície do aço.

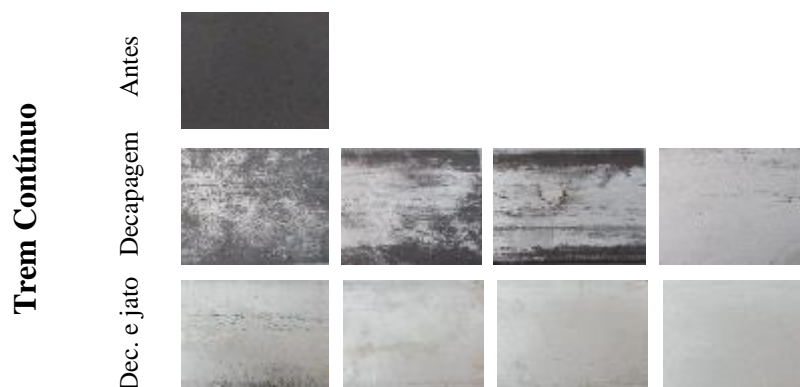


Figura 6.17 - Superfícies do aço 1.4404 produzido no Trem contínuo (canto esquerdo superior – estado negro; do centro esquerdo para direito – 30, 60, 90 e 120 minutos na decapagem; do canto inferior esquerdo para direito – 30, 60, 90 e 120 minutos na decapagem e jato).

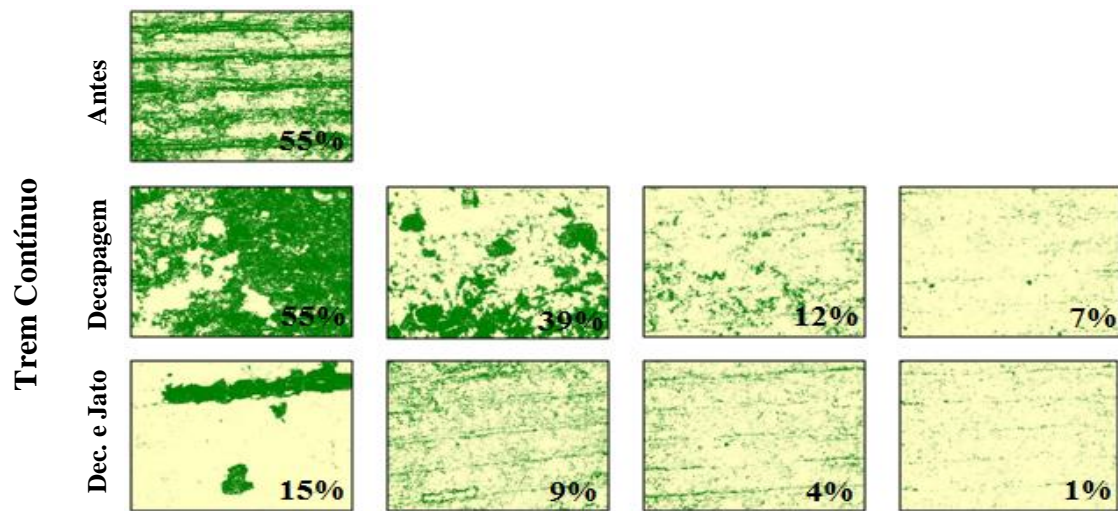


Figura 6.18 - Microscopias ao tipo de aço 1.4404 produzido no trem contínuo, em que a cor verde corresponde aos óxidos presentes na superfície do aço. (canto esquerdo superior – estado negro; do centro esquerdo para direito – 30, 60, 90 e 120 minutos na decapagem; do canto inferior esquerdo para direito – 30, 60, 90 e 120 minutos na decapagem e jato).

De forma similar, a Figura 6.19 apresenta a imagem correspondente ao mesmo tipo de aço, mas proveniente do trem aberto (TA).

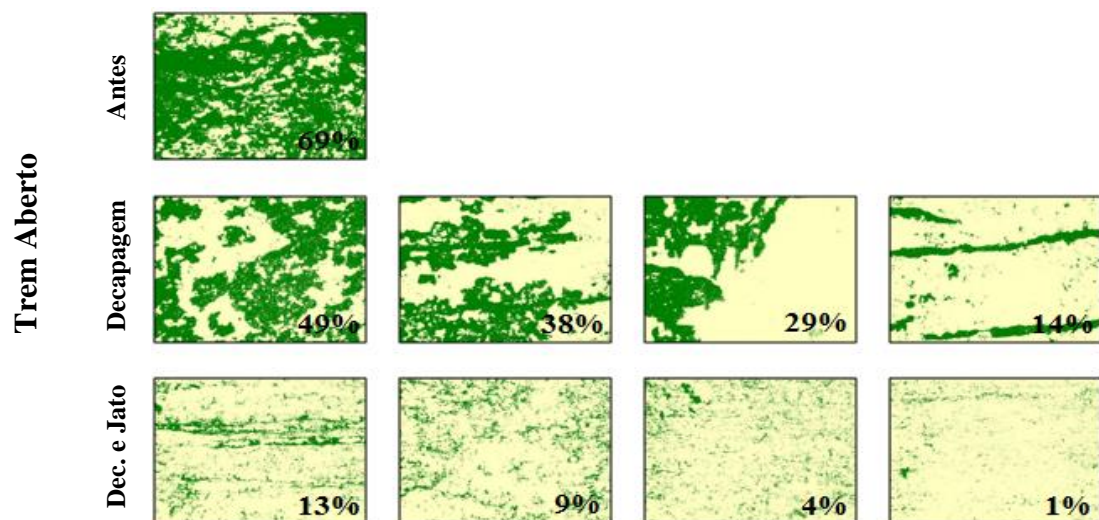


Figura 6.19 - Microscopias ao tipo de aço 1.4404 produzido no trem aberto, em que a cor verde corresponde aos óxidos presentes na superfície do aço. (canto esquerdo superior – estado negro; do centro esquerdo para direito – 30, 60, 90 e 120 minutos na decapagem; do canto inferior esquerdo para direito – 30, 60, 90 e 120 minutos na decapagem e jato).

Tal como referido anteriormente, os aços mais utilizados no processo da decapagem são os aços 1.4542, 1.4404, 1.4571, 1.4305 e 1.4307. Foram analisadas através de microscopia ótica amostras destes aços provenientes de ambos os trens (trem aberto (TA) e trem contínuo (TC)).

Trem Contínuo

Para compreender a ação do banho ácido ao longo do tempo, calculou-se também um valor médio da percentagem de remoção correspondente a cada tempo de decapagem. Os valores médios são apresentados na Figura 6.20. Na Figura 6.21 está representada a evolução da percentagem de área de superfície oxidada em função do tempo de decapagem, para cada tipo de aço.

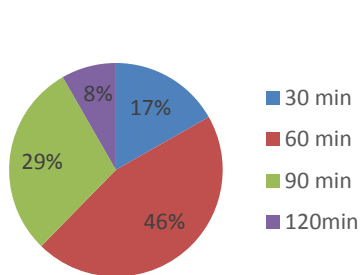


Figura 6.20 - Percentagens de remoção entre os diferentes tempos

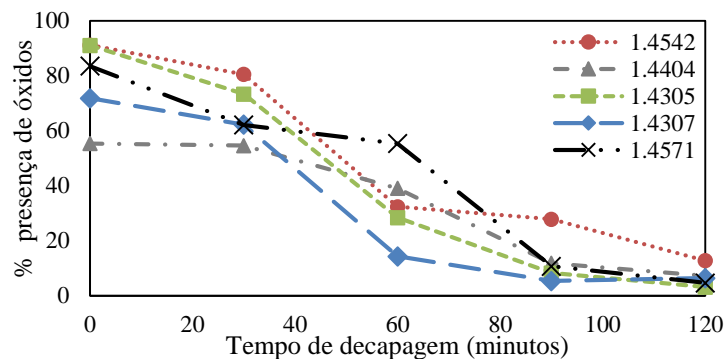


Figura 6.21 - Percentagem da presença de óxidos na superfície do aço inoxidável ao longo do tempo da decapagem.

Analisando a Figura 6.20 verifica-se que para um tempo de decapagem entre 30 e 60 minutos o banho ácido atua fortemente no aço, sendo que é a meia hora de decapagem com maior percentagem de remoção de óxidos. Posteriormente, entre os 90 e os 120 minutos, o banho ácido só remove cerca de 8% dos óxidos, o que revela que a maioria do material já está decapado aos 90 minutos.

Observando a Figura 6.21, verifica-se que a maioria dos aços segue a mesma tendência, com a exceção do aço 1.4542 e do 1.4571. O aço 1.4542 é da família dos aços martensíticos, e o banho ácido usado está direcionado para os aços austeníticos. Por conseguinte, verifica-se uma dificuldade acrescida na decapagem deste tipo de aço. O aço 1.4305 apresenta uma área superior com óxidos na sua superfície comparativamente os outros aços austeníticos. Contudo, a sua decapagem ocorre facilmente e após 90 minutos considera-se que este material poderia ser retirado do banho ácido visto que, a diferença de percentagem de remoção nos tempos

seguintes não é significativa. Tal como no caso do aço 1.4307, concluiu-se que a partir dos 90 minutos o aço imerso no banho pode ser retirado. O aço 1.4404 é difícil de decapar, sendo que só a partir dos 100 minutos é que estabiliza a percentagem de remoção de óxidos. Isto significa que a partir deste momento o aço ao não ser removido do banho só irá consumir os ácidos. O aço 1.4571 tem uma tendência de decapagem ao longo do tempo diferente das outras, pois entre os 30 e os 60 minutos a remoção de óxidos é insignificante. Observa-se que só após 60 minutos de imersão é que o banho de decapagem tem o efeito desejado sobre o aço.

A percentagem média da área de superfície com óxidos ao fim de 120 minutos é de cerca 7%. Estas serão posteriormente removidas através da lavagem com o jato de água. Para compreender a eficiência da lavagem elaborou-se a Figura 6.22. Da análise desta, concluiu-se que o jato lava uma maior área com óxidos entre os 0 e os 30 minutos. Após a lavagem do material este não fica isento de óxidos na superfície e seguidamente volta a oxidar. Isto revela que não é possível decapar eficientemente um aço em meia hora. Só após 60 minutos de imersão, nos tipos de aço mais fáceis de decapar, como por exemplo o aço 1.4305, é que é possível ter apenas 8% de superfície com óxidos após a lavagem a jato.

Para analisar se é viável remover uma maior área de superfície oxidada com o jato por forma a antecipar a remoção do aço do banho ácido, contruiu-se a Figura 6.23 em que se representa a percentagem da presença de óxidos na superfície do aço inoxidável ao longo do tempo da decapagem e em seguida lavagem a jato de água.

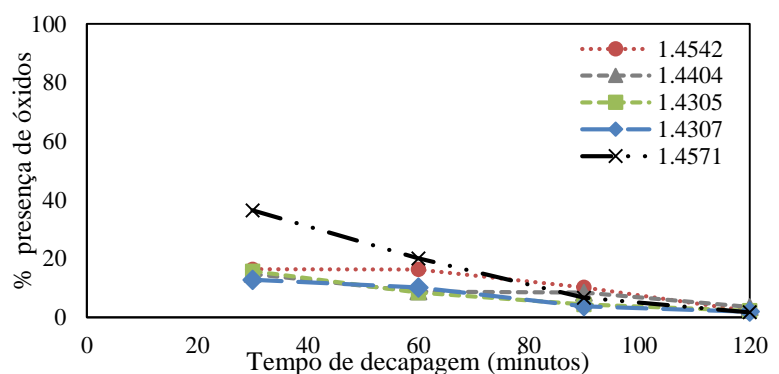
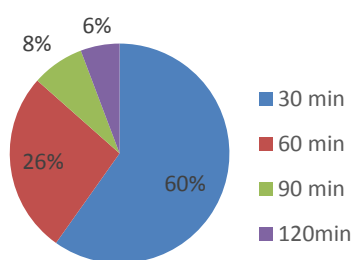


Figura 6.22 - Percentagens de remoção entre os diferentes tempos admitidos.

Figura 6.23 - Percentagem da presença de óxidos na superfície do aço inoxidável ao longo do tempo da decapagem e em seguida lavagem a jato de água.

Observa-se que a percentagem média da presença de óxidos nas superfícies do aço inoxidável após 120 minutos é de 2%. Assim, concluiu-se que os aços 1.4305 e 1.4307 podem ser retirados do banho ácido ao fim de 90 minutos.

Trem Aberto

Tal como no caso dos aços provenientes do trem contínuo, procedeu-se de forma semelhante na análise e tratamento de resultados experimentais relativos aos aços provenientes do trem aberto.

Através da análise da Figura 6.24 verifica-se que a percentagem de remoção de óxidos entre os 30 e os 60 minutos de imersão no banho é a mais elevada (33%). Também no período de tempo compreendido entre os 60 e os 90 minutos a percentagem de remoção é significativa. Concluiu-se que só após os 90 minutos de imersão é que os aços se consideram na maioria decapados.

A partir da observação da Figura 6.25 conclui-se que os aços 1.4307 e 1.4305 são os que apresentam maior percentagem de óxido na superfície e são também os mais rápidos a decapar, pois a partir dos 90 minutos a percentagem de óxido estabiliza. O aço 1.4542 é o mais difícil de decapar, pela mesma razão anteriormente mencionada no caso do trem contínuo.

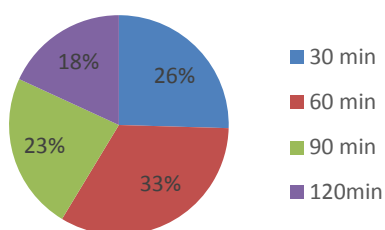


Figura 6.24 - Percentagens de remoção entre os diferentes tempos admitidos.

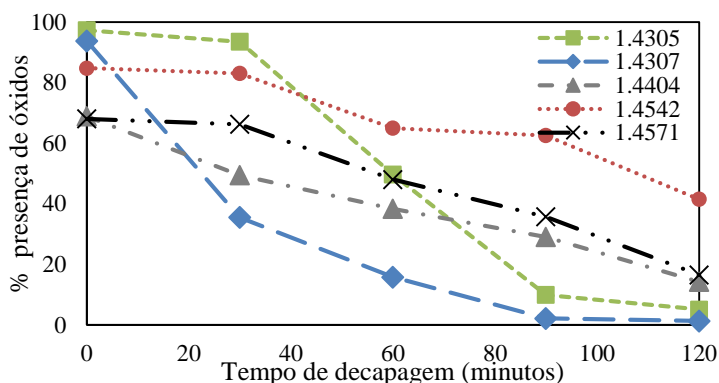


Figura 6.25 - Percentagem da presença de óxidos na superfície do aço inoxidável ao longo do tempo da decapagem.

A percentagem média da presença de óxidos no fim de 120 minutos é de 16%, sendo que posteriormente é removida pela lavagem a jato. Para compreender a eficiência do jato elaborou-se a Figura 6.26.

Analisando a Figura 6.26, concluiu-se que o jato lava uma maior área de óxidos durante os primeiros 30 minutos. Contudo, até aos 90 minutos as percentagens de remoção continuam a ser elevadas o que significa que o aço ainda apresenta uma elevada área com óxidos. Para analisar se é possível remover uma maior área de superfície oxidada com o jato e antecipar a remoção do aço do banho ácido, elaborou-se a Figura 6.27.

A percentagem da presença de óxidos nas superfícies do aço inoxidável após 120 minutos é de 3%. Relativamente ao aço 1.4542 verifica-se que durante lavagem a jato é lhe retirada uma maior área de óxidos à sua superfície comparativamente aos outros aços.

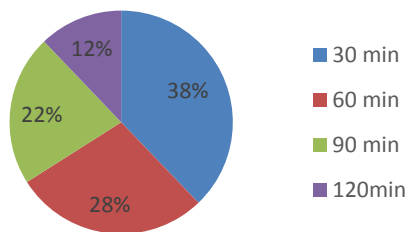


Figura 6.26 - Percentagens de remoção entre os diferentes tempos admitidos.

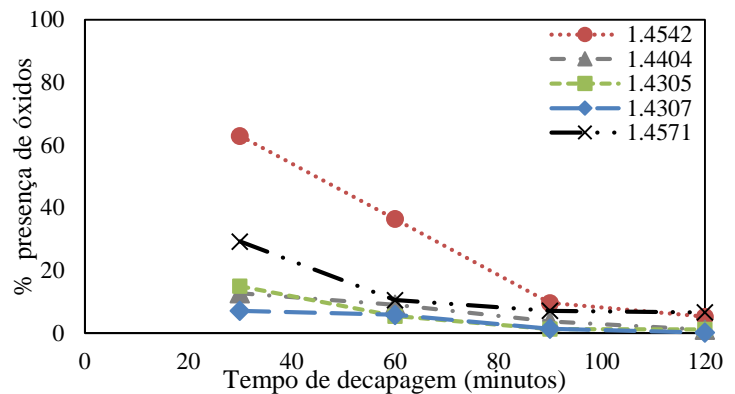


Figura 6.27 - Percentagem da presença de óxidos na superfície do aço inoxidável ao longo do tempo da decapagem.

Trem aberto vs Trem contínuo

A decapagem dos aços produzidos no TC e no TA têm tempos de decapagem diferentes, uma vez que os que são produzidos pelo TA apresentam uma maior área com óxidos à superfície. Esta característica é demonstrada no exemplo seguinte, em que se compara o aço 1.4305 produzido no TC e no TA. O aço 1.4305 (família dos aços austeníticos) é um dos aços mais decapados na Böllinghaus. O que provém do TA apresenta uma superfície repleta de óxidos o que dificulta o processo de decapagem, como se pode observar na Figura 6.28. Na Figura 6.29 verifica-se que o aço 1.4542 (família dos aços martensíticos) proveniente do TA apresenta uma menor percentagem visível à superfície de óxidos. No entanto, a evolução da percentagem de óxidos na superfície ao longo do tempo revela a sua dificuldade em ser decapado. Esta observação remete para o facto dos óxidos estarem mais dispersos ao longo da

superfície mas em maior quantidade em profundidade. Tal como se pode observar na Figura 6.29, o aço 1.4542 proveniente do TC é mais fácil de decapar.

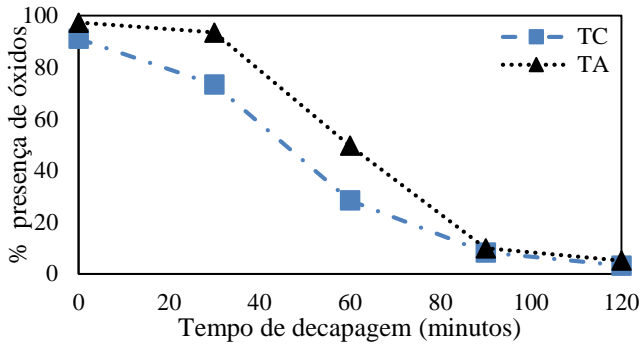


Figura 6.28 - Aço 1.4305 produzido no Trem Contínuo e no Trem Aberto.

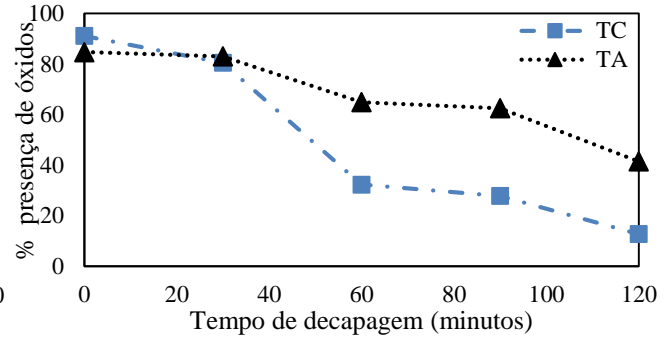


Figura 6.29 - Aço 1.4542 produzido no Trem Contínuo e no Trem Aberto.

Trem aberto e Tratamento térmico vs Trem aberto

O tratamento térmico (TT) tem como objetivo alterar as propriedades físicas e mecânicas, como a resistência mecânica, realizando um aquecimento (recozimento) ou arrefecimento controlado. Deste modo, a camada de óxido formada na superfície de um aço proveniente do tratamento térmico é quimicamente mais consistente que num aço sem tratamento térmico. Perante este facto, comparou-se aços das duas famílias com tratamento térmico para analisar as diferenças nos tempos de decapagem.

Na Figura 6.30 verificou-se que o aço proveniente de TA e TT tem maior dificuldade a decapar que o aço proveniente de TA. O tratamento térmico no tipo de aço austenítico provoca um aumento da resistência à corrosão e consequentemente um aumento do tempo de decapagem.

Relativamente ao único aço martensítico decapado no banho ácido (aço 1.4542) (Figura 6.31) não revela uma diferença significativa entre o aço que provém do TT+TA e do TA. É de referir que o tratamento térmico aplicado aos aços martensíticos é diferente do tratamento térmico aplicado aos aços austeníticos, nomeadamente no que diz respeito às temperaturas utilizadas no tratamento térmico, bem como aos objetivos do tratamento. No caso de um aço martensítico, o objetivo do tratamento térmico é realizar um recozimento de modo a melhorar a estabilidade química entre os compostos.

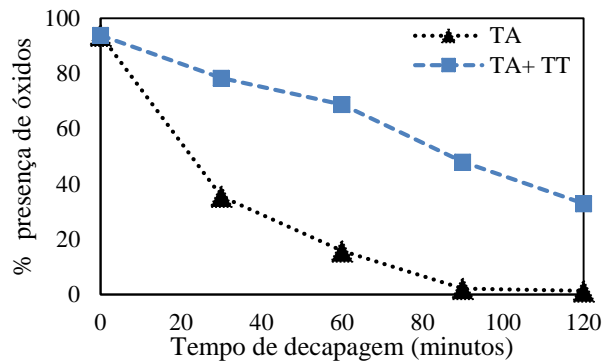


Figura 6.30 - Comparação entre o aço 1.4307 proveniente de TA e de TA+TT.

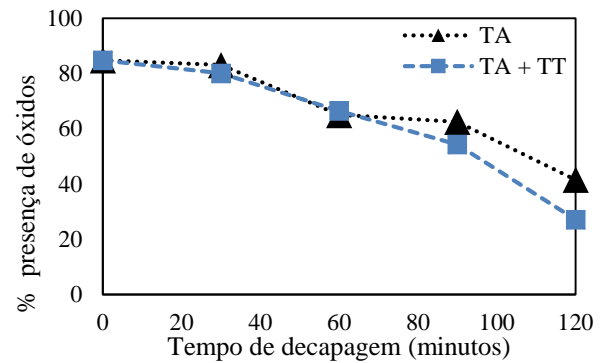


Figura 6.31 - Comparação entre o aço 1.4542 proveniente de TA e de TA+TT.

Em geral, com esta avaliação microscópica à espessura de óxido concluiu-se que os aços inoxidáveis que demoram menos tempo a decapar são os de qualidade 1.4307 e 1.4305, com um tempo médio de decapagem de 90 minutos. O aço mais difícil de decapar é o aço martensítico (aço de qualidade 1.4542), com um tempo médio de decapagem de 120 minutos.

Os aços provenientes do trem aberto (TA) demoram mais tempo a decapar e caso seja aplicado um tratamento térmico o tempo de decapagem aumenta.

7. FASE MELHORAR

Na etapa Melhorar do DMAIC foi realizada uma sessão de *Brainstorming* (secção 7.1) de forma a recolher ideias e discutir as mesmas. Na secção 7.2 são apresentadas as propostas de melhoria para o setor da decapagem e os respetivos resultados (secção 7.3) com a implementação de algumas destas propostas. É de salientar que durante o tempo de estágio teve-se em conta as conclusões da etapa Analisar (Capítulo 6) de forma a melhorar o controlo dos banhos ácidos.

7.1. *Brainstorming*

A sessão de *Brainstorming* realizada reuniu todos os colaboradores e técnicos da decapagem com o intuito de discutir e recolher ideias para a melhoria do setor. Foram recolhidas um total de 32 ideias, tendo sido agrupadas em 21 grupos. Em seguida, realizou-se uma votação para as melhores ideias e verificou-se que as ideias mais relevantes são: **1º** - Mais mão-de-obra (1); **2º** - Manutenção das pontes rolantes (2); **3º** - Sistema de remoção das lamas nos banhos de decapagem (3); **4º** - Otimização dos tempos da decapagem (4); **5º** - Carregamento dos cavaletes (5), Ventiladores na zona dos tanques da decapagem (6), Aquecimento no gabinete de decapagem (7).

Com o objetivo de organizar as ideias de forma mais eficiente e com critérios de prioridade, na Figura 7.1 está representada uma Matriz importância vs Custo, adaptada da Matriz de Covey (Teixeira, 2015). Os números apresentados anteriormente, na forma (nº), identificam as ideias. Os tamanhos dos círculos diferenciam a urgência ou não das ideias propostas ou seja, quanto maior for o círculo maior a urgência da ideia.

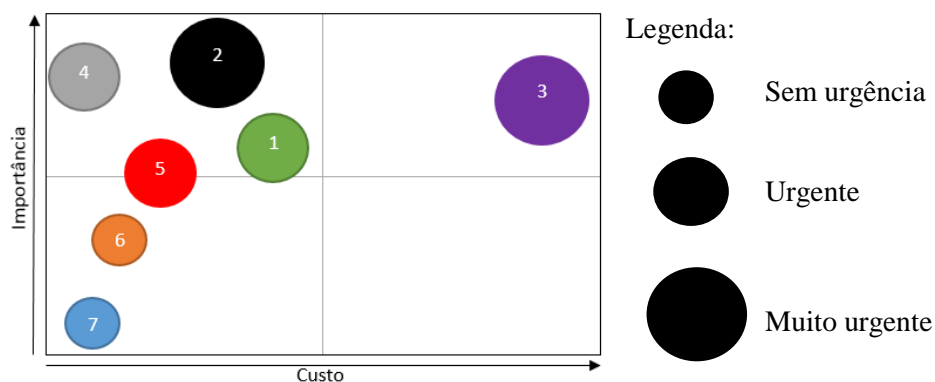


Figura 7.1 - Matriz importância vs Custo.

Através da análise da Matriz importância vs Custo verifica-se que as ideias mais importantes são a manutenção das pontes rolantes, mais mão-de-obra, otimização dos tempos de decapagem e um sistema de remoção de lamas nos banhos da decapagem.

7.2. Propostas de melhoria

Nesta Secção são apresentadas as propostas de melhoria para o setor da decapagem, em que, nalgumas delas, se teve em conta a informação obtida na sessão de *brainstorming*.

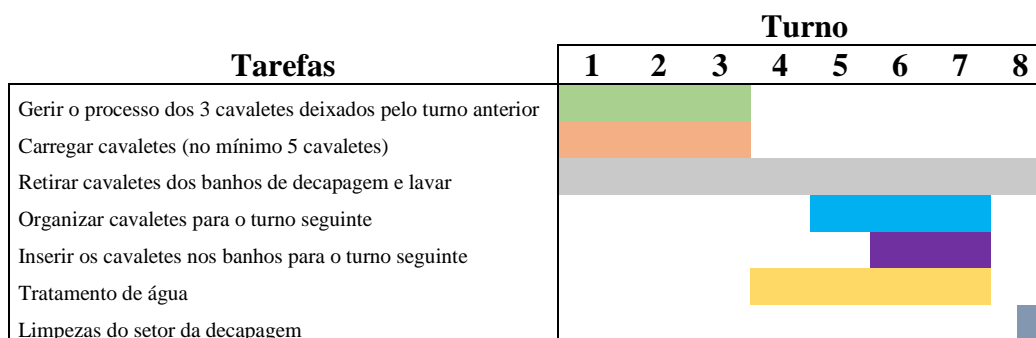
7.2.1. Plano ótimo de trabalhos

A implementação de um plano de trabalhos (atua na ideia nº4) facilita na organização dos colaboradores, de modo, a que estes consigam produzir o máximo possível e a existir uma homogeneidade de métodos entre turnos. Comparando os diagramas de Gantt realizados, referentes a cada turno (Anexo H), verificou-se que o turno B e C manobraram cerca de oito cavaletes. Na realidade, o turno B organizou-se de forma a produzir com um método mais eficaz, tendo tempos médios mais baixos como se pode analisar no Anexo I. A diferença sentida entre os dois turnos deve-se ao facto do turno B realizar a maioria das cargas nas primeiras três horas e as lavagens a jato de água serem realizadas com dois colaboradores.

Em seguida é apresentado o plano ótimo de trabalhos para o setor da decapagem para um turno de 8 horas. No início de cada turno considera-se que existe material deixado pelo turno anterior. Na Tabela 7.1 é apresentada a organização das tarefas ao longo de um turno. É de notar que o carregamento e descarregamento dos cavaletes, tal como a lavagem a jato de água, devem ser sempre realizados com o mínimo de dois colaboradores.

Com a implementação do plano ótimo são sempre manobrados 8 cavaletes em cada turno, considerando que não ocorrem segundas decapagens. Portanto, com a implementação do plano prevê-se que se passe de 20 para 24 cavaletes por dia.

Tabela 7.1 - Organização das tarefas ao longo de um turno (8 horas).



7.2.2. Redução dos tempos de decapagem

Conforme a informação analisada anteriormente, comprovou-se que cada tipo de aço requer um determinado tempo de decapagem. Por isso mesmo, é vantajoso uma diminuição dos tempos de decapagem (atua na ideia nº4) nos aços 1.4307, 1.4305, 1.4404, 1.4571 e 1.4542 até ao tempo determinado na etapa Analisar (Capítulo 6) para cada tipo de aço apresentado na Tabela 7.2. No entanto, deve-se ter em conta que estes valores foram obtidos com amostras e que, possivelmente, o tempo de decapagem das barras serão ligeiramente superiores.

Tabela 7.2 - Tempos ótimos da decapagem para cada qualidade de aço.

Qualidade	Tempos de decapagem	
	TA	TC
1.4307	90	90
1.4305	90	90
1.4404	120	100
1.4571	120	100
1.4542	120	120

7.2.3. Carregamento de cavaletes

Para garantir a saúde dos colaboradores é necessário projetar um suporte que no mínimo evite os movimentos ascendentes e descendentes. O suporte projetado, representado na Figura 7.2, auxilia os colaboradores embora também necessite de uma ponte rolante para elevar e baixar o cavalete. O custo do suporte é de 785 euros e serão necessários quatro suportes, dois na zona de carga e outros dois na zona de descarga. Considerando o valor de não ter acidentes de trabalho e os gastos de manutenção após a instalação dos suportes por ano, obteve-se um PayBack (Retorno de investimento) de 2,21 anos.

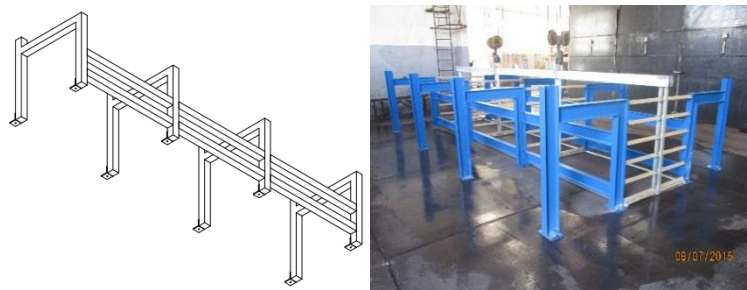


Figura 7.2 - Suporte para o carregamento dos cavaletes (Projeto e implementação dos 2 suportes na zona de carga).

7.2.4. Ventilação da área envolvente

A ventilação da área envolvente (atua na ideia nº 6) é necessária para garantir a saúde dos colaboradores do setor da decapagem e dos restantes setores, uma vez que estes também são afetados com os odores provenientes dos ácidos, principalmente quando os tanques da decapagem estão abertos. A ventilação é posicionada no teto na zona de descarga, de forma que o fluxo de ar percorra o sentido de dentro para fora do pavilhão. A área conta com dois ventiladores, um em cada limite do início da zona de descarga. O custo de um ventilador (Figura 7.3) é de 739 €.



Figura 7.3 - Ventilação (Solução implementada).

7.2.5. Melhoria da qualidade dos banhos ácidos

7.2.5.1. Composição do Surtec NB

Durante o tempo da fase de análise identificou-se que os banhos da decapagem atingiam o fim da vida rapidamente e sem formação de lamas significativas, tal como nos banhos realizados antes do início da laboração em contínuo. Deste modo, conclui-se que a paragem de dois dias por semana facilitava a sedimentação dos sólidos suspensos nos banhos ácidos.

Na composição do Surtec NB, um dos inibidores tem a função de eliminar a precipitação dos sólidos suspensos formados ao longo da utilização do banho ácido. Por isso, é vantajoso uma diminuição de cerca de 20% deste inibidor para facilitar a formação de algumas lamas que permitam aumentar o tempo de vida do banho. Esta medida deve ser implementada de modo a não afetar depois as limpezas dos banhos, dado que, sem este inibidor a tarefa de remover as lamas seria muito difícil.

A melhoria esperada com a implementação desta solução é de um aumento do número de dias produtivos de um banho e uma diminuição do número de revitalizações. Caso ocorra uma diminuição de duas revitalizações por ano ou seja, menos uma em cada tanque de decapagem, obtém-se uma poupança de 6 665 euros.

7.2.5.2. Sistema de remoção das lamas dos banhos ácidos

Quando se remove o banho ácido verifica-se que, no fundo do tanque existem lamas ácidas que fazem diminuir a eficiência do processo de decapagem. Assim sendo, torna-se relevante a remoção destes sólidos ao longo do tempo de produção de um banho ácido.

Um sistema de filtração (atua na ideia nº3) é um método de separação dos sólidos do líquido através da passagem deste por um meio permeável capaz de reter as partículas sólidas. O sistema de separação sugerido tem de ser totalmente eficiente de modo a remover as partículas de menor tamanho. Para tal utiliza-se uma microfiltração com um grau de filtragem de 10 µm e com a solução ácida a circular sob pressão.

O sistema de filtração (ver Figura 7.4 e Anexo J) pode ser construído por um conjunto de filtros cilíndricos, em que a solução ácida entra na parte superior e a formação do bolo de lamas ocorre na parte exterior dos filtros. Estes podem conter um sistema de lavagem automática que funciona através da injeção de ar no sentido inverso à entrada de líquido. Seguidamente, o bolo seca e descola-se das paredes do filtro caindo para um suporte de recolha (Scanacon, 2010). As vantagens e desvantagens deste equipamento são apresentados na Tabela 7.3

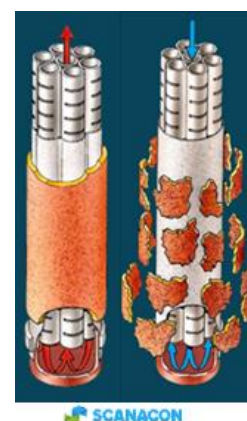


Figura 7.4 - Filtração (Scanacon, 2010).

Tabela 7.3 - Vantagens e Desvantagens dos sistemas de remoção dos sólidos.

Vantagens	Desvantagens
-Limpeza automática com água.	-Quantidade de sólidos elevada é necessário dois filtros em paralelo.
-Eficaz na remoção de partículas sólidas.	-Troca de filtros quando já não são eficientes.
-Redução de 70% das lamas (Scanacon, 2010).	
-Menos custos na neutralização das águas.	

O custo do sistema de filtração é de aproximadamente de 95 000 euros. Supondo uma redução de 10% no número de operações de limpeza, humidade das lamas de 50%, um consumo de ácidos de 20% e transportes externos (50%) resulta num *PayBack* de 2,22 anos e um TIR (taxa interna de rentabilidade) de 29% (no Anexo K é apresentada a explicação dos cálculos).

7.2.5.3. Sistema de recirculação e recuperação dos ácidos

Um sistema de recirculação permite uma alta taxa de decapagem e, por conseguinte, um baixo consumo de peróxido de hidrogénio.

O sistema de recuperação de ácidos mais favorável é o de permuta iónica. Este processo de separação consiste numa troca estequiométrica de aniões ou catiões de uma fase líquida por catiões ou aniões de uma resina permutadora de iões (Portal Laboratórios Virtuais, 2015).

A recuperação do ácido permite reciclar o ácido livre o que significa que os complexos de fluoretos não são adsorvidos na totalidade. Consequentemente, estes ficam na água e como tal, procede-se posteriormente à neutralização da mesma (Brown, 1993).

O processo de troca iónica tem uma duração de cinco minutos e necessita que a solução ácida passe previamente num pré-tratamento (por exemplo, uma filtração) de modo a remover a maioria dos sólidos suspensos presentes na solução. Este processo de troca iónica tem dois movimentos, um ascendente e outro descendente (Figura 7.5). No movimento ascendente, a solução ácida previamente filtrada é bombeada para o fundo do leito da resina (1), o ácido é adsorvido pela resina e os sais metálicos são desacidificados e recolhidos no topo (2). No movimento descendente, a água é bombeada para o topo do leito (3) e ocorre a dessorção do ácido purificado, e podendo ser devolvido ao tanque de decapagem (4).



Figura 7.5 - Esquema do processo de troca iónica.

Em seguida na Tabela 7.4 são apresentadas as vantagens e desvantagens do processo de troca iónica.

Tabela 7.4 - Vantagens e Desvantagens do processo de troca iónica.

Vantagens	Desvantagens
-Recuperação dos ácidos (50%) (Scanacon, 2010).	-O eléctrodo utilizado na medição da condutividade tem um tempo de vida curto e necessita de recalibrações frequentes.
-Prolongamento do tempo de vida de um banho ácido.	-Tempo de vida da resina é de sete anos a operar a temperaturas inferiores a 32°C.
-Menos custos na neutralização das águas.	

O custo do sistema de recirculação e recuperação dos ácidos é de 56 000 euros. O investimento do sistema de filtração e do sistema de recirculação e recuperação dos ácidos no setor da decapagem tem um *PayBack* de 1,55 anos, supondo uma redução de 50% no consumo dos ácidos (cálculos apresentados no Anexo M). Caso a redução seja inferior a 50%, o período de retorno é superior (como se pode observar na Figura 0.6 no Anexo M). A taxa interna de rentabilidade é de aproximadamente 50%.

7.2.5.4. Sistema de agitação

O sistema atual de agitação é uma borbulhação provocada por injeção de ar através de um tubo no fundo das paredes dos tanques de decapagem. A injeção de ar requer uma passagem de gás pela solução ácida provocando a evaporação dos ácidos (Bianchi, 2000), a necessidade de lavagem dos gases produzidos e o aumento dos custos de aquecimento.

Um dos sistemas de agitação existente no mercado é um conjunto de aspersores que recircula a solução ácida, em dois níveis diferentes de altura ao longo da lateral do tanque da decapagem. Desta forma, a turbulência na solução ácida aumenta, reduz-se o tempo de decapagem, diminui-se as perdas de ácidos e mantem-se os sólidos suspensos na solução para uma maior eficiência do sistema de filtração (Scanacon, 2010). Esta solução é apresentada como alternativa do sistema já instalado, ou no caso da implementação do sistema de filtração.

7.2.5.5. Adição automática

No mercado dos equipamentos para decapagem existe um sistema de controlo automático do ácido livre e dos metais dissolvidos, que posteriormente calcula as adições necessárias e executa-as de forma automática. Relativamente à adição de água, este sistema de controlo também determina a quantidade necessária e procede à sua adição de forma automática. Uma das fortes vantagens desta implementação é o facto de possibilitar a manutenção das diversas variáveis dos banhos da decapagem em valores considerados ideais, nomeadamente o potencial redox. Além disso, deve considerar-se este sistema de controlo como um contributo essencial para a qualidade de decapagem dos materiais. O custo do sistema de adição automática é de 49 700 euros. O investimento neste sistema não é rentável visto que o *Payback* é muito superior a 5 anos. No entanto, foi importante fazer este estudo uma vez que o controlo permanente do potencial redox era vantajoso para o processo de decapagem.

7.3. Resultados

A redução dos tempos de decapagem, a alteração da composição do Surtec NB, o plano ótimo de trabalho, o suporte de carregamento de cavaletes e por fim a ventilação da área envolvente são as propostas de melhoria anteriormente referidas já implementadas. As restantes propostas ainda se encontram em análise.

7.3.1. Capacidade de produção

Os resultados relativos aos custos dos banhos da decapagem são apresentados no Anexo N e os respetivos indicadores são apresentados na Tabela 7.5.

Tabela 7.5 - Indicadores económicos.

Banho	€/ Toneladas	€/m ²	€/ N° barras
4-15	19,24	0,44	0,62
5-15	19,72	0,45	0,57

Os indicadores económicos relativos aos banhos 4-15 e 5-15 são relativamente melhores que os banhos anteriores. Obteve-se aproximadamente um ganho de 1 €/tonelada nos dois banhos. No entanto, a meta definida não foi alcançada. O valor mais baixo foi de 19,24 €/tonelada, sendo o valor proposto como meta o de 18 €/tonelada.

7.3.2. Nível Sigma

Nesta fase recalcula-se o nível sigma do processo e segue-se o método realizado na fase Medir (Tabela 7.6).

Tabela 7.6 - Resultados do cálculo de DPMO para o banho 4-15 e 5-15.

Qualidades	Banho 4-15			Banho 5-15		
	Rendimento (%)	N° atados com defeito	DPMO	Rendimento (%)	N° atados com defeito	DPMO
4307	68	280	316742	84	51	158879
4571	63	25	367647	68	7	318182
4404	55	274	451400	87	36	126761
4542	45	182	554878	70	42	304348
4305	78	96	221198	78	49	219731

No banho 4-15, os DPMO para cada tipo de aço são elevados. Realizando uma aproximação global ao banho obtém-se os seguintes valores: DPMO de 340 214 com um rendimento de 66%. Os dados recolhidos mostram que o banho 4-15 aponta para um nível sigma de 1,91.

No banho 5-15, os DPMO para cada tipo de aço também são elevados. Realizando uma aproximação global ao banho obtém-se os seguintes valores: DPMO de 73 442 com um rendimento de 93%. Os dados recolhidos mostram que o banho 5-15 aponta para um nível sigma de 2,95.

Comparativamente com a meta proposta nos objetivos, verifica-se que o nível sigma aumentou de 1,74 para 2,95, encontrando-se muito próximo do valor apontado como objetivo (nível sigma igual a 3). Nos defeitos por milhão de oportunidades, obteve-se uma diminuição acentuada de 398 929 para 73 442. No entanto, não foi alcançado o valor objetivo. O melhoramento atingido deve-se à implementação da diminuição da redução dos tempos de decapagem.

O banho 5-15 que teve menor tempo de vida (42 dias), menor produção (812 toneladas), maiores custos e diluições significativas, foi o banho com nível sigma superior. O referido banho teve tempos de decapagem ótimos, com valores ótimos dos parâmetros de controlo e com menor oscilação nas toneladas/dia (desvio-padrão igual a 5), o que levou à realização de diluições significativas para aumentar o seu tempo de vida. Estas diluições levam a um aumento dos custos que não foi significativo. O banho 4-15 teve maior tempo de vida (53 dias), maior produção (1080 toneladas), menores custos e diluições não significativas, não obteve um valor sigma elevado, o que significa que houve um aumento do número de segundas decapagens e tempos excessivos de decapagem. Caso o nível sigma deste banho fosse superior, era necessário uma diluição significativa para obter o mesmo tempo de vida.

Concluindo, para obter um banho com qualidade e eficácia, como o banho 5-15, por vezes é necessário comprometer os custos e a produção.

7.3.3. OEE

Para o cálculo da eficiência dos novos banhos utilizou-se a mesma estratégia implementada na fase Medir (Tabela 7.7).

Tabela 7.7 - Resultados dos cálculos OEE para os banhos 4-15 e 5-15.

	Banho 4-15	Banho 5-15
Indicador de desempenho (%)	88	85
Disponibilidade operacional (%)	99	99
Taxa de qualidade (%)	93	95
OEE (%)	81	80

Analisando os resultados apresentados anteriormente e o Anexo O, verifica-se que o valor de OEE de aproximadamente 80% é um valor elevado, ideal para o processo produtivo em análise. O aumento do valor OEE deve-se sobretudo ao aumento da produção (toneladas) por banho, aos parâmetros ótimos, à diminuição das segundas decapagens, à diminuição dos tempos excessivos, e ao prolongamento da idade dos banhos ácidos.

7.4. FASE CONTROLAR

A última fase do método DMAIC é a fase Controlar. Esta fase tem como objetivo analisar a eficiência das soluções apresentadas na fase anterior, de modo a, assegurar que a nova solução foi eficaz na resolução do problema. A fase Controlar não foi aplicada no quadro do trabalho realizado. É aqui brevemente descrita numa perspetiva de trabalho futuro. Assim, será necessário verificar se o plano ótimo de trabalhos continua a ser implementado e se os tempos de decapagem continuam a diminuir. Relativamente ao suporte de carregamento é necessário contabilizar, a longo prazo, o número de acidentes com o intuito de verificar se estes sofrem realmente uma diminuição.

Com a implementação de todas as soluções para a melhoria da qualidade dos banhos é necessário continuar a contabilizar o número de dias de vida do banho, os tempos de decapagem e o número das segundas decapagens. Nos sistemas de filtração e de recuperação de ácidos também é importante analisar a quantidade de lamas ácidas e o consumo de ácidos. Outra forma de controlar a rentabilidade da resina de permuta iónica é medir a condutividade dos ácidos à entrada e à saída do sistema. Por fim, era interessante realizar uma análise semelhante à etapa Analisar deste trabalho, de forma a verificar a melhoria do banho ácido e a diminuição dos tempos de decapagem.

As únicas ações de controlo já executadas foram: registo de todas as paragens programadas e não programadas, do aumento do número de medições do Ferro total, Ferro II e Ferro III.

8. CONCLUSÕES

O estudo desenvolvido neste trabalho contribui para melhorar o processo de decapagem química da Böllinghaus Steel. Foi aplicada a metodologia DMAIC, tendo-se conseguido uma minimização do custo de operação de decapagem, um melhoramento substancial no nível sigma e no indicador OEE (*Overall Equipment Effectiveness*). Na Tabela 8.1 é apresentado um resumo dos resultados conseguidos com este estudo, bem como os valores iniciais e os valores objetivo inicialmente definidos.

Tabela 8.1 - Valores resultantes da implementação DMAIC no presente projeto.

Objetivos	Inicial	Meta	Atual
Aumento do OEE	55%	85%	80%
Redução de DPMO	398 929	66807	73442
Aumento do nível sigma	1,74	3	2,95
Redução do custo por tonelada	20,61 €/ton	18 €/ton	19,24€/ton

As fases da metodologia DMAIC foram desenvolvidas ao longo do presente projeto, excetuando a fase Controlar (secção 7.4). O estudo do processo de decapagem química da Böllinghaus Steel permitiu identificar os problemas e aprofundar a compreensão do processo. Assim, foi possível compreender que nos banhos ácidos um elevado potencial redox não se traduz num consumo de ácido fluorídrico, que com a adição de ácido fluorídrico após a adição de ácido sulfúrico (50 litros cada) não se observa um aumento da concentração de ácido fluorídrico, e que uma diluição significativa não beneficia a longevidade do banho mas ajuda a reatividade deste. Relativamente aos tipos de aço decapados, o aço que demora mais tempo a decapar é o aço 1.4542, com um tempo médio de decapagem de 120 minutos. Os aços mais fáceis de decapar são os aços 1.4305 e o 1.4307, com um tempo médio de decapagem de 90 minutos. A laminação em Trem aberto, de aços de todas as qualidades, aumenta o tempo de decapagem comparativamente aos aços provenientes do Trem contínuo.

Ao longo do estágio na Böllinghaus Steel foram implementadas algumas das propostas mencionadas na etapa Melhorar (Capítulo 7), nomeadamente: o plano ótimo de trabalhos (24 cavaletes/dia); a redução dos tempos de decapagem, o suporte de carregamento dos cavaletes (785 €/unidade); a ventilação na área envolvente (739 €/unidade); e a alteração da composição do Surtec NB. Estas melhorias possibilitaram o aumento do tempo de vida, a diminuição do

tempo de decapagem, a diminuição dos custos, a diminuição das segundas decapagens e a melhoria do bem-estar dos colaboradores.

8.1. Perspetivas de trabalho futuro

Na etapa Melhorar (Capítulo 7) foram mencionadas outras propostas de melhoria para o processo de decapagem ainda não implementadas, tal como o sistema de remoção de lamas (redução de 50% da humidade das lamas, 10% limpezas e 50% transportes externos - PB: 2,22 anos), o sistema de recirculação e regeneração de ácidos (redução de 50% no consumo dos ácidos - PB: 1,55 anos), e o sistema de agitação (como alternativa do sistema já instalado, ou no caso da implementação do sistema de filtração).

Relativamente ao investimento do sistema de filtração e de recuperação de ácidos, este traria fortes benefícios financeiros para o setor de decapagem, e posteriormente o nível sigma, os custos, o DPMO e o OEE seriam influenciados positivamente.

Nos sistemas de filtração e de recuperação de ácidos também é importante analisar a quantidade de lamas ácidas e o consumo de ácidos. Por fim, era interessante realizar uma análise semelhante à etapa Analisar deste trabalho, de forma a verificar a melhoria do banho ácido e a diminuição dos tempos de decapagem.

Das soluções já implementadas é necessário confirmar se a alteração da “composição do ácido fluorídrico” revela uma poupança/ano de 6 665€, e implementar os restantes suportes de carregamento de cavaletes verificando um *PayBack* de 2,21 anos.

9. BIBLIOGRAFIA

Angel, C., Berglind, T., Frestad, A., Lunner, S. & Anders, W. (1997, 4 Junho). *Method for pickling steel*. Patente nº: EP 0776993 A1.

ArcelorMittal (2010). *Stainless Steel and Corrosion*. s.l.: Stainless Europe.

Baptista, E. (2011). *Decapagem Química de Inox nº2*. Surtec. s.l.: s.n.

Bianchi, M. (2000, 22 Março). *Process for stainless steel pickling and passivation without using nitric acid*. Patente nº: EP 0582121 B1.

Böllinghaus (2014). IT60 PP – *Manutenção de banhos na decapagem*. Vieira de Leiria: s.n.

Brown, C. J. (1993, 4 Fevereiro). *Process and apparatus for treating fluoride containing acid solution*. Patente nº: WO 1993002227 A1.

Carreira, A. C. S. (2013). *Implementação de metodologias Lean na indústria de laminagem de aço*. Departamento de Engenharia Mecânica: Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra.

Casals, N. F. (2010). *Annealing oxides on duplex stainless steels*. Lulea University of technology: Department of applied physics and Mechanical Engineering.

Castro, R. A. (2013). *Lean Six Sigma – para qualquer negócio*. 2ª ed. s.l.: IST Press.

Ferreira, L. M., Silva, C. & Mesquita, C. (1998). *Melhoria de um Processo Logístico de Reabastecimento Interno recorrendo à Metodologia DMAIC*. s.l.: s.n.

Ferreira, M. (2015). *Corrosão de Materiais*. Universidade de Aveiro: Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica.

Filho, V. L. F. (1997). *Acabamentos dos aços inoxidáveis*. s.l.: Acesita S.A. Associada à Usinor.

Francis, T. (1999). *OEE for Operators: Overall (Equipment Effectiveness)*. Shopfloor series. Japan: The Productivity Press Development Team. OEE, pp. 30-31.

Gupta, P. & Sri, A. (2012). *Seis Sigma*. s.l.: Vida Económica - Editorial, SA.

Henkel (1998). *Decapagem do Aço Inoxidável – Processo Cleanox*. s.l.: Surface Technologies.

Hidaka, Y., Anraku, T. & Amaya, H. (2001, 3 Abril). *Martensitic Stainless Steel having oxide scale*. Kyoto, Patente nº: US 6210806 B1.

Kerr, H. (2009). *Gas carburization of thin – Walled Austenitic Stainless Steel (Formed via the reduction of metal oxide extrusions)*. s.l.: Georgia Institute of Technology.

Lucas, J. M. (2002). *The essential Six Sigma*. United States: American Society for Quality.

Otimização do processo de decapagem química numa empresa de produção de perfis de aço

Mang, T. (2014). *Industrial Cleaners - Special print of Encyclopedia of Lubricants and Lubrication*. Germany : Springer Berlin Heidelberg.

Negri, D. & Giordani, P. B. (2004, 27 Outubro). *Process for pickling stainless steel in the absence of nitric acid and in the presence of chloride ions*. EP 1050605 B1.

Osório, A. H. (2014). *A economia global em 2015: perspectivas incertas*. Económico. [Online]. Disponível em: <http://economico.sapo.pt>. [Acedido em 10 Fevereiro 2015].

Petrobrás (2011). *Efeito dos elementos de liga nos aços*. [Online]. Disponível em: <http://ftp.demec.ufpr.br/> [Acedido em 20 Fevereiro 2015].

Portal laboratórios virtuais de Processos Químicos. [Online]. Disponível em: <http://labvirtual.eq.uc.pt>. [Acedido em 26 Maio 2015].

Scanacon (2010). *Acid/Solids Separation*. [Online]. Disponível em: <http://www.scanacon.com>. [Acedido em 15 Maio 2015].

Teixeira, P. F. C. (2015). *Análise e otimização dos fluxos e processos do setor de desempenho numa empresa de produção de perfis de aço*. Departamento de Engenharia Mecânica: Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra.

Tossey, B. (2011). *Steam Oxidation Resistance of Shot: Austenitic Stainless Steel*. s.l.: The Ohio State University.

Valentino, G., Bruno, G. P. & Negri, D. (2001, 12 Julho). *Brightening/passivating metal surfaces without hazard from emissions of oxides of nitrogen*. Patente nº: WO2001049899 A2.

ANEXOS

Anexos

Anexo A - Plano de Projeto.

Tabela 0.1 - Plano de Projeto.

DMAIC	Plano de Trabalhos	Duração (dias)	Fevereiro			Março			Abril			Maio			Junho								
			7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Definir	Formação sobre o processo industrial	15																					
	Definição da equipa	1																					
	Elaboração do plano do projeto	2																					
	Objetivo do projeto	1																					
	Descrição do fluxo de produção	10																					
	Definição do problema	5																					
	SIPOC	5																					
Medir	CTQ	5																					
	Estudo dos elementos químicos no banho ácido	15																					
	Microscopia ótica ao aço inoxidável ao longo do tempo da decapagem	35																					
	Estudo do efeito das adições de ácidos nos banhos ácidos	35																					
	Estudo da quantidade de Ferro II e Ferro III durante o tempo de vida de um banho	35																					
	Estudo dos métodos de trabalho de cada turno - Diagrama de Gantt	5																					
	Diagrama de dependências	6																					
	Cálculo do rendimento	7																					
	Cálculo do DPMO	7																					
	Cálculo do nível sigma	7																					
Analisar	Cálculo da média e Desvio Standard	7																					
	Cálculo de OEE	5																					
	Análise Causa-Raiz (Diagrama Ishikawa)	15																					
	Análise das microscopias óticas e comparação entre os aços TA vs TC e TT+TA vs TA	15																					
	Análise do efeito das adições nos banhos ácidos	15																					
Melhorar	Análise da quantidade de Ferro II e Ferro III durante o tempo de vida de um banho	15																					
	Análise da longevidade de um banho ácido	15																					
	Propostas de parâmetros ótimos a controlar	20																					
	Propostas de melhorias	10																					
Controlar	Sessões de Brainstorming	5																					
	Matriz importância vs Custo	3																					
	Recálculo do nível sigma e do OEE	3																					
Controlar	Definição dos parâmetros a serem controlados	10																					
	Revisões	10																					
	Aspectos a melhorar e respectivas correções	15																					

Anexo B – Análises às águas ácidas.

Tabela 0.2 - Análises às águas ácidas provenientes do processo de decapagem

Ensaio / Método	Resultados	Unidades
pH (20,1°C)	6,9	Escala de Sorensen
Níquel	17	mg/L Ni
Ferro	2,3	mg/L Fe
Fluoretos	14	mg/L F
Cobre	<0,2	mg/L Cu
Crómio	0,4	mg/L Cr
Condutividade a 20°C	7900	µS/cm a 20 °C
Zinco	<0,2	mg/L Zn
Molibdénio	1,51	mg/L
Cálcio	5200	mg/L Ca
Dureza Total	1400	mg/L CaCO ₃
Sólidos Suspensos Totais	<5	mg/L

Otimização do processo de decapagem química numa empresa de produção de perfis de aço

Anexo C – Determinação da densidade do banho.

BÖLLINGHAUS STEEL **TRABALHO STANDARDIZADO**

Determinação da Densidade do Banho Tanque 2 e Tanque 3 (T2 e T3)

Peso em g / 100 cm³ = densidade (g/cm³)

IT62 PP.0 Última Revisão: 00072014 Departamento: Qualidade Autor: Susana Antunes

Área de Trabalho		0
Laboratório decapagem		
N.º	Tarefa	Tempo
1	Recolher amostra do banho no Tanque 2 e Tanque 3	0:00:00
2	Colocar o recipiente com as amostras do banho, dentro de um recipiente com água.	0:00:00
3	Lavar balão de 100 ml	0:00:00
4	Ligar a Balança - Efectuar o zero	0:00:00
5	Colocar o balão de 100 ml na balança	0:00:00
6	Efectuar a Tara	0:00:00
7	Encher balão de 100 ml com amostra do banho do tanque 1	0:00:00
8	Colocar o balão de 100 ml com a solução na balança	0:00:00
9	Retirara a leitura do peso em grammas	0:00:00
10	Proceder ao registo da leitura da densidade dividindo o valor da pesagem por 100	0:00:00
11	Repetir as etapas anteriores descritas nos pontos 3 a 9; para determinação dos valores da amostra do T3	0:00:00
12	Registar o resultado em suporte informático.	0:00:00
13	Avallar as correcções necessárias	0:00:00
14		0:00:00
15		0:00:00
16		0:00:00
17		0:00:00
18		0:00:00
19		0:00:00
20		0:00:00
Tempo Total		0:00:00

Equipamentos		Qualidade
1.	Dois recipientes identificados com T2 e T3	1.
2.	Dois Balões de 100 ml	2.
3.	Balança	3.
4.	Funil	4.
5.		5.
6.		6.
7.		7.
8.		8.
9.		9.

Segurança

1. Uso de EPI'S e especial atenção no manuseamento dos equipamentos.
2. Operar o equipamento segundo as recomendações do fabricante (ver Manual de Instruções)
- 3.
- 4.

Anexo D – Análise de uma amostra do banho.



TRABALHO STANDARDIZADO

Análise de Amostra do banho da Decapagem- (T2 e T3)

4 10

BOLETIM DE ANÁLISE DA DECAPAGEM

REGISTO DE ENXARDA E CORREÇÕES PROPOSTA

DATA: _____ OPERADOR: _____

CALIBRAÇÃO DO CONDUTIVIMETRO: Potencial Redox Condutividade

TANQUE	Temperatura (°C)	pH	Potencial Redox (mV)	Condutividade (mS/cm)	Concentração de H ₂ SO ₄ (mS/cm)	Concentração de HNO ₃ (mS/cm)
TANQUE 2	20,0	1,2	300	100	100	100
TANQUE 3	20,0	1,2	300	100	100	100

Área de Trabalho			Comentários
Laboratório decapagem			
NO.	Tarefa	Tempo	
1	Recolher amostra do banho no Tanque 2 e Tanque 3. Deixar arrefecer até à temperatura aproximada de 20 °C a 25 °C	0:00:00	Usar EPI's necessários inclusive máscara de protecção inalar.
2	Colocar num copo pequeno uma pequena quantidade da amostra com identificação dos tanques onde foi efetuada a recolha	0:00:00	
3	Colocar a sonda de medição do Potencial redox dentro do copo e proceder à leitura de 3 medições do potencial redox (OrPmV)	0:00:00	
4	Registrar os valores no IP10 PP - Boletim de Análises da Decapagem	0:00:00	Se o Potencial Redox estiver abaixo dos 300 mV deve-se adicionar em laboratório Surtec A até este estar acima dos 300mV.
5	Repetir as etapas anteriores (nº 1 a 4) para determinação dos valores da amostra do T3	0:00:00	Colocar equipamento a zero e seguir as etapas de 3 e 4.
6	Com uma pipeta de 2 ml, retirar do recipiente T2 a mesma porção de amostra do banho	0:00:00	Cuidados: lavar bem os recipientes, com água destilada, removendo os resíduos de análises anteriores.
7	Colocar os 2 ml de porção num balão de 100ml, e perfarer a quantidade com água desionizada.	0:00:00	Concentração de H ₂ SO ₄ Tabela Henkel: procurar o valor de condutividade de A na 1ª coluna e retirar valor da coluna C (valor em g/L)
8	Transferir a solução para um copo de plástico e medir a condutividade de ácido sulfúrico (Condutividade A. mS/cm) com a sonda	0:00:00	
9	Pipetar 2ml da solução de nitrato de ferro III para o mesmo copo, agitar bem e medir a condutividade de ácido Fluorídrico (Condutividade mS/cm)	0:00:00	Concentração HF =(Cond B - Cond A) - 10 = valor Coluna A. Retirar o valor da coluna D. (valor em g/L)
10	Proceder ao registo das três leituras da Condutividade H ₂ SO ₄ (mS/cm) - I10PP - Boletim de Análises da decapagem	0:00:00	
11	Repetir as etapas anteriores (nº 6 a 10) para determinação dos valores da amostra do T3	0:00:00	Zerar o equipamento antes da leitura da amostra seguinte
12	Registrar o resultado em suporte informático.	0:00:00	Registrar no Movlizer
13	Avaliar as correções necessárias	0:00:00	Em caso de dúvidas consultar responsável do processo
14		0:00:00	
15		0:00:00	
16		0:00:00	
17		0:00:00	
18		0:00:00	
19		0:00:00	
20		0:00:00	
Tempo Total		0:00:00	

Equipamentos / Recursos	Qualidade
1. Dois recipientes identificados com T2 e T3	
2. Dois Balões de 100 ml	
3. Pipeta de 2 ml	
4. Solução de Nitrato de Ferro III	
5. Dois copos de plástico (T2 e T3)	
6. Água desionizada	
7. Medidor de Potencial Redox	
8. Sonda de Condutividade	

Segurança	
1	Uso de EPI'S e especial atenção no manuseamento dos equipamentos
2	Operar o equipamento segundo as recomendações do fabricante (ver Manual de Instruções)
3	
4	

IT61 PP.2

Última Revisão
05 de junho 2015

Departamento
Qualidade

Autor
Susana Antunes

Anexo E – Determinação do Ferro II e Ferro III



TRABALHO STANDARDIZADO

Determinação do Ferro II e Ferro III Banho da Decapagem - Tanque 2 e Tanque 3 (T2 e T3)

Concentração de Ferro II=Consumo de Permanganato de Potássio (ml) = 1,396

Concentração de Ferro III=Consumo de Tiossulfato de Sódio (ml) = 5,58

BOLETIM DE ANÁLISES DA DECAPAGEM

RESUMO DE ENXOFRE E CORREÇÃO TEMPORAL

SAP: _____

IDENTIFICAÇÃO DO CONSUMO/VEZES: _____

CORREÇÃO: _____

Item	Consumo	Tempo
Tanque 2	1,396	1,396
Tanque 3	5,58	5,58

IT75 PP.1

Última Revisão: 5 de junho 2015

Departamento: Qualidade

Autor: Susane Antunes

Área de Trabalho			
Laboratório decapagem			
NO.	Tarefa	Tempo	Comentários
1	Recolher amostra do banho no Tanque 2 e Tanque 3. Deixar amolecer até a temperatura aproximada de 20 °C a 25 °C	0:00:00	Usar EPP's necessários inclusive máscara de proteção inalar.
2	Ferro II : Pipetar 10 ml de amostra do banho T2 para um balão volumétrico de 100 ml e perfazer com água desionizada	0:00:00	
3	Pipetar 10 ml da solução preparada anteriormente (ponto 2) para um Erlenmeyer de 300 ml. Adicionar 50 ml de água desionizada e 20 ml de ácido sulfúrico.	0:00:00	Misturar bem a solução.
4	Titular com permanganato de potássio 0,005M até a viragem de Incolor/Incolor/verde água a Rosa	0:00:00	
5	Registrar o consumo de Permanganato de Potássio no impresso I10PP - Boletim de Análises da decapagem	0:00:00	Efectuar o cálculo de acordo com a diluição da amostra
6	Repetir as etapas anteriores (nº 2 a 5) para determinação dos valores da amostra do T3	0:00:00	I10PP - Boletim de Análises da decapagem
7	Ferro III : Pipetar 10 ml de amostra do banho T2 para um balão volumétrico de 100 ml e perfazer com água desionizada	0:00:00	
8	Pipetar 10 ml da solução preparada anteriormente (ponto 2) para um Erlenmeyer de 300 ml. Adicionar 50 ml de água desionizada.	0:00:00	Misturar bem a solução. Poderá haver formação de um precipitado
9	Adicionar 20 ml de solução de clorato de cálcio a 10%	0:00:00	
10	Deixar passar 1 minuto e adicionar 0,5 g de iodeto de potássio e dissolver bem. Adicionar 50ml de ácido clorídrico e misturar bem.	0:00:00	Fig.9 - Aspeto após adição de ácido clorídrico
11	Deixar a solução a reagir em repouso, no escuro e tapada durante 15 minutos	0:00:00	Fig.11 - Aspeto após reação no escuro
12	Titular com tiossulfato de sódio 0,1N até viragem de castanho a amarelo	0:00:00	Fig.12 - Aspeto após titulação com tiossulfato de sódio
13	Adicionar algumas gotas de solução de amido (a solução toma-se azul escura)	0:00:00	Fig.13 - Aspeto após adição de solução de amido
14	Continuar a titular até viragem a incolor/verde água.	0:00:00	Fig.14 -Aspeto final da solução
15	Registrar o consumo de Tiossulfato de Sódio (ml) no impresso I10PP - Boletim de Análises da decapagem	0:00:00	
16	Repetir as etapas anteriores (nº 7 a 14) para determinação dos valores da amostra do T3	0:00:00	
17	Registrar o resultado em suporte informático.	0:00:00	Registrar no Mobilizer
18	Avaliar as correcções necessárias	0:00:00	Em caso de dúvidas consultar responsável do processo
19		0:00:00	
20		0:00:00	
Equipamentos / Recursos Materiais		Tempo Total	Qualidade
1.	Osbe copos identificados com T2 e T3	1.	
2.	Pipeta de 10 ml	2.	
3.	Erlenmeyer de 300 ml	3.	
4.	Solução Padrão de Permanganato de Potássio 0,005M	4.	
5.	Ácido sulfúrico 25%	5.	
6.	Solução de Clorato de cálcio a 10%	6.	
7.	Iodeto de Potássio	7.	
8.	Solução de ácido clorídrico 37%	8.	
9.	Solução Tiossulfato de Sódio 0,1N	9.	
10.	Solução de Amido 1%	10.	
Segurança			
1	Uso de EPT'S e especial atenção no manuseamento dos equipamentos		
2	O manuseamento das amostras dos banhos, ácido clorídrico e ácido sulfúrico deve ser feito dentro da hota com aspiração ligada		
3			
4			

Anexo F - Boletim de análises da decapagem.

BOLETIM DE ANÁLISES DA DECAPAGEM



REGISTO DE ENSAIOS E CORRECÇÕES PROPOSTA

DATA ____ / ____ / ____ OPERADOR _____

CALIBRAÇÃO DO CONDUTIVIMETRO: Potencial redox Condutividade

TANQUE 2							
Hora recolha da amostra h min	Tolerância de valores	T °C	1ª Leitura	2ª Leitura	3ª Leitura	Média das leituras mS/cm	Adições correctivas Surtec A
Amostra directa do banho	Potencial redox (OrP)	> 300 mV					
	Densidade	< 1,375 g/cm3	Peso balão vazio (M ₀)		Peso balão + amostra (M ₁)	Cálculo Densidade = (M ₁ - M ₀) / 100	
Amostra diluída 2 ml -> 100 ml	Condutividade do H ₂ SO ₄	140 - 160 mS/cm					Concentração (g/L) Adição H ₂ SO ₄
	Condutividade do HF	40 - 60 mS/cm					Concentração (g/L) Adição Surtec NB
Amostra diluída 10 ml - > 100ml	Ensaio do Ferro II *	< 20 g /L	_____ x 1,396 =			Cálculo Ferro Total < 100 g/L	
	Ensaio do Ferro III **		_____ x 5,580 =				

TANQUE 3							
Hora recolha da amostra h min	Tolerância de valores	T °C	1ª Leitura	2ª Leitura	3ª Leitura	Média das leituras mS/cm	Adições correctivas Surtec A
Amostra directa do banho	Potencial redox (OrP)	> 300 mV					
	Densidade	< 1,375 g/cm3	Peso balão vazio (M ₀)		Peso balão + amostra (M ₁)	Cálculo Densidade = (M ₁ - M ₀) / 100	
Amostra diluída 2 ml -> 100 ml	Condutividade do H ₂ SO ₄	140 - 160 mS/cm					Concentração (g/L) Adição H ₂ SO ₄
	Condutividade do HF	40 - 60 mS/cm					Concentração (g/L) Adição Surtec NB
Amostra diluída 10 ml - > 100ml	Ensaio do Ferro II *	< 20 g /L	_____ x 1,396 =			Cálculo Ferro Total < 100 g/L	
	Ensaio do Ferro III **		_____ x 5,580 =				

* - deve indicar-se o consumo de Permanganato de Potássio em ml

** - deve indicar-se o consumo de Tiosulfato de Sódio em ml

Anexo G – Produção

Tabela 0.3 - Taxas de ocupação de todas as operações da empresa Böllinghaus.

Máquinas/Setores	Taxa de ocupação
F4	90
F5	63,4
F6	87,6
EPR 300	73,4
XLR 40	78,7
CV45	72,3
RC120	90,8
GEP50	92,6
Fresa 1	60,6
Fresa 2	88,5
Decapagem	93,9
Jato	84
Estiragem 1+2	88,5
Corte	71
Embalagem	84,8

Anexo H - Diagramas de Gantt relativos a todos os turnos (por ordem descendente: 1º - Turno A, 2º - Turno B, 3º - Turno C, 4º - Turno D)

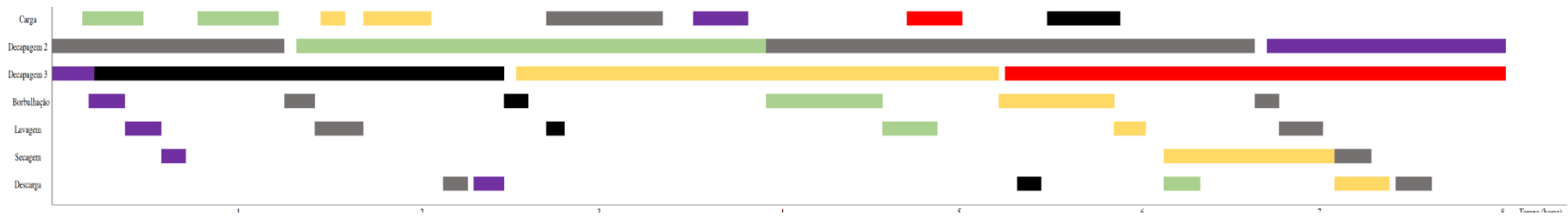


Figura 0.1 - Diagrama de Gantt do turno A.

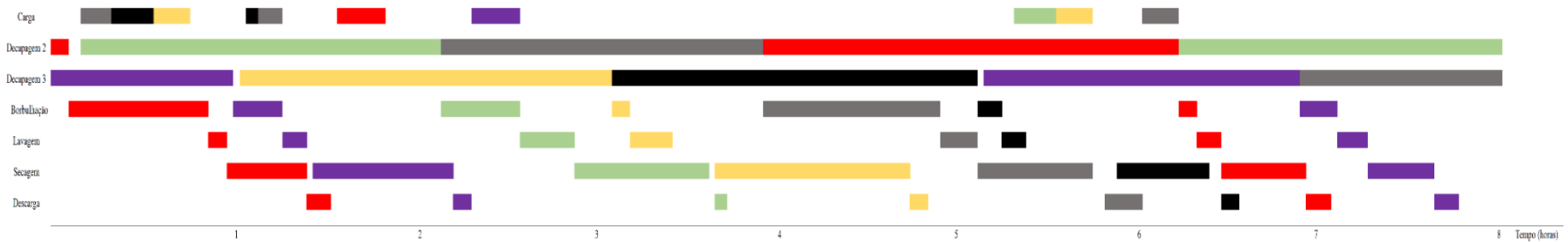


Figura 0.3 - Diagrama de Gantt do turno B.

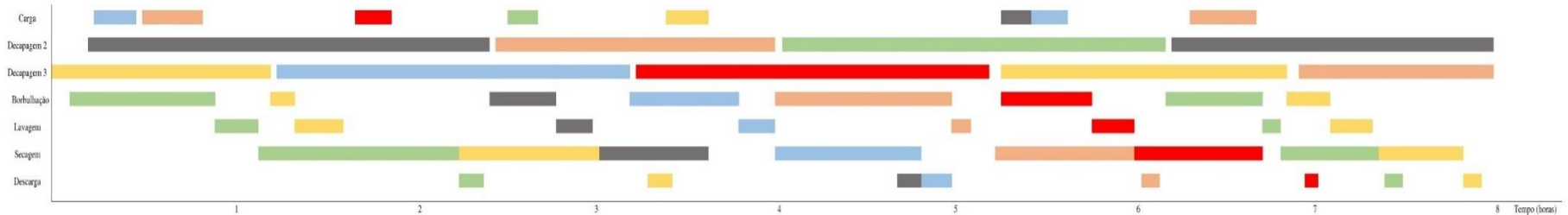


Figura 0.2 - Diagrama de Gantt do turno C.

Otimização do processo de decapagem química numa empresa de produção de perfis de aço

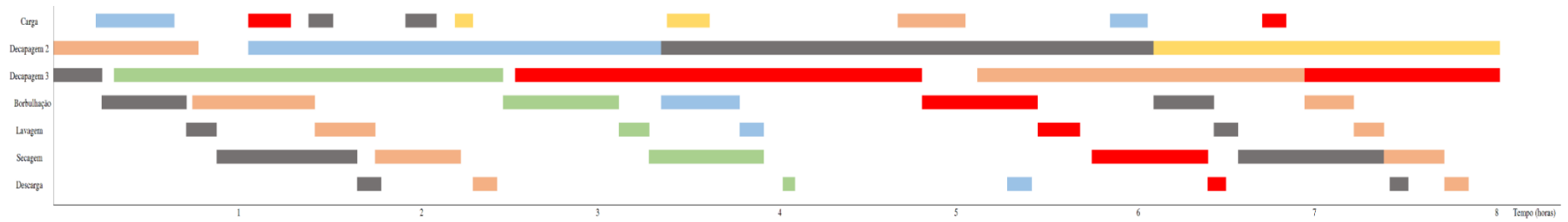


Figura 0.4 - Diagrama de Gantt do turno D.

Legenda dos diagramas de gantt:

- Cavalete VI
- Cavalete IX
- Cavalete I
- Cavalete X
- Cavalete II
- Cavalete VIII
- Cavalete VII
- Cavalete IIX

Anexo I – Análise dos tempos das operações em cada turno.

Tabela 0.4 - Média dos tempos das operações na decapagem relativos a cada turno.

Média dos tempos de cada operação (horas)						
Turnos	Carga	Decapagem	Borbulhação	Lavagem	Secagem	Descarga
A	0:28	2:24	0:17	0:12	0:25	0:10
B	0:12	2:03	0:22	0:10	0:39	0:06
C	0:13	1:54	0:30	0:14	0:42	0:08
D	0:12	2:12	0:26	0:12	0:27	0:05

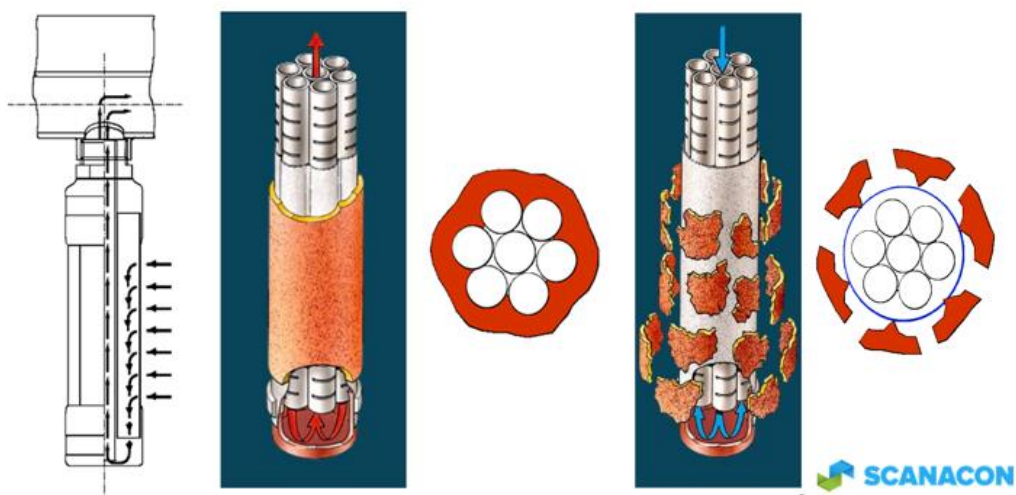
Anexo J – Esquema representativo do sistema de filtração (Scanacon, 2010).

Figura 0.5 - Sistema de filtração (imagem cedida pela Scanacon).

Anexo K – Cálculos gerais para a análise económica e de viabilidade.

Para calcular os custos de investimento considerou-se que a instalação dos equipamentos era 20% do custo do equipamento.

Considerou-se todos os custos atuais aqueles que pertencem ao setor da decapagem, tais como os custos relativos à formação do banho, limpezas, adições (ácidos), lamas ácidas, transportes externos, taxas, consumíveis (exemplo: energia). Nos custos futuros teve-se em conta as percentagens das diminuições possíveis para cada um dos custos mencionados anteriormente.

Numa análise de projeto de investimento é necessário calcular o VAL (valor atual líquido), TIR (taxa interna de rentabilidade) e o *PayBack* (Retorno de investimento). O VAL tem como função principal avaliar a viabilidade de um projeto de investimento através do cálculo do valor atual de todos os cash-flows (custos atuais, futuros e de investimento). O TIR é uma taxa que representa a máxima rentabilidade do projeto, ou seja, no final do período de vida do projeto o VAL é igual a zero. O *PayBack* é o tempo entre o investimento inicial e o momento no qual o investimento realizado fica totalmente liquidado. Estes métodos para avaliar os projetos são calculados da seguinte forma:

$$\text{Sendo os Meios libertos} = \text{Custos Atuais}_{\text{Ano}} - \text{Custos Futuros}_{\text{Ano}} - \text{Investimentos}_{\text{Ano}}, \quad (0.1)$$

$$VAL = \frac{\text{Meios libertos}_{\text{Ano}}}{(1 + \text{taxa atualização})^{\text{Ano}}} \quad (0.2)$$

$$\text{PayBack} = \frac{\text{Investimento}}{\text{Meios libertos}^{\text{Ano}=1}} \quad (0.3)$$

Anexo M – Análise económica e de viabilidade (exemplo retrativo)

Tabela 0.5 - Cálculo do Valor atual líquido para o sistema de filtração e de recuperação de ácidos.

Ano	0	1	2	3	4	5
Investimento	181.200,00 €					
Custos Atuais (Manutenção, Limpeza e Formação)		369.783,50 €	369.783,50 €	369.783,50 €	369.783,50 €	369.783,50 €
Custos Futuros (Manutenção, Limpeza e Formação)		252.967,78 €	252.967,78 €	252.967,78 €	252.967,78 €	252.967,78 €
Meios Libertos	-181.200,00 €	116.815,72 €	116.815,72 €	116.815,72 €	116.815,72 €	116.815,72 €
VAL (Valor Atual Líquido)	-181.200,00 €	111.253,07 €	105.955,30 €	100.909,81 €	96.104,58 €	91.528,18 €
VAL Acumulado	-181.200,00 €	-69.946,93 €	36.008,37 €	136.918,19 €	233.022,77 €	324.550,95 €

Nota: Cálculos admitindo redução de 50% no consumo dos ácidos e taxa de atualização 5%

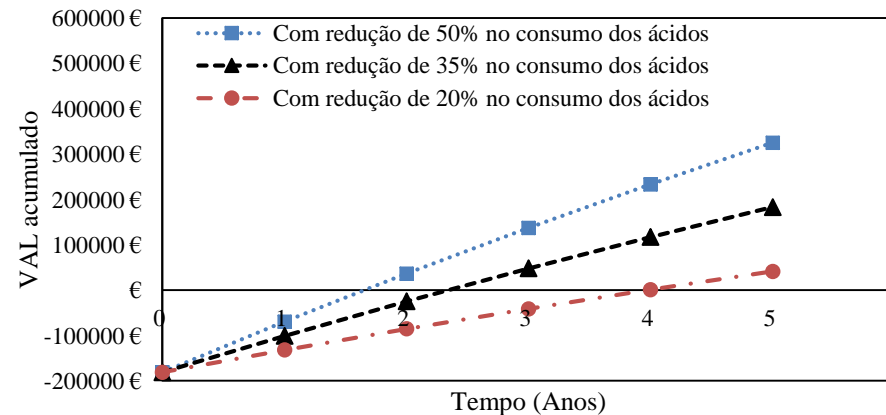


Figura 0.6 - Cenários pessimistas vs cenário possível.

Anexo N – Resultados relativos aos banhos ácidos.

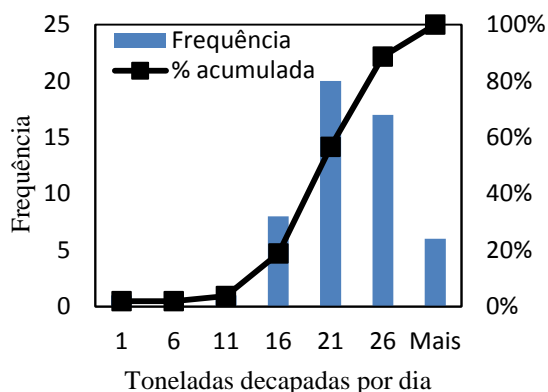


Figura 0.8 - Toneladas decapadas por dia relativamente ao banho 4-15.

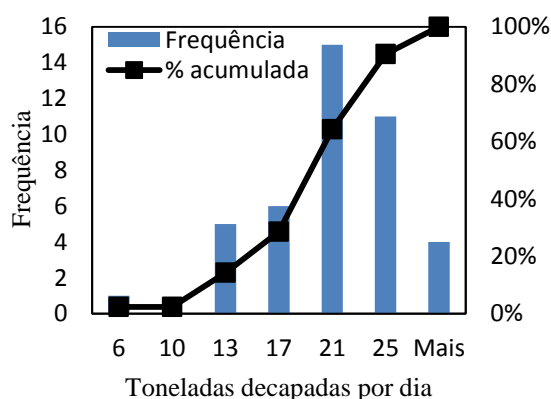


Figura 0.7 - Toneladas decapadas por dia relativamente ao banho 5-15.

Tabela 0.6 - Média e desvio-padrão do banho 4-15 e 5-15.

	Banho 4-15	Banho 5-15
Média	20	19
Desvio-padrão	5,6	5

Tabela 0.7 - Dias produtivos dos banhos, número de barras, peso e área superficial dos aços decapados.

Banho	Dias produtivos	Nº barras	Peso (Ton)	Área superficial (m ²)
4-15	53	33 284	1 080	47 190
5-15	42	28 036	812	35 870

Tabela 0.8 - Custos de produção dos banhos 4-15 e 5-15.

Banho	Surtec A	Surtec NB	H ₂ SO ₄	Custo Limpezas	Total
4-15	7 160	8 676	871	4 085	20 792
5-15	5 097	8 127	676	2 115	16 016

Anexo O – Resultados relativos ao OEE dos banhos ácidos 4-15 e 5-15.

Tabela 0.9 - Dados relativos aos banhos 4-15 e 5-15 para o cálculo do OEE.

Dados	Banho 4-15	Banho 5-15
Tempo de vida de um banho (dias)	53	42
Tempo programado (dias)	53	41
Tempo total produtivo dos atados no banho (minutos)	294 347	120 208
Tempo excessivo e tempo 2 ^a decapagem (minutos)	34 988	17 906
Tempo disponível para produção (dias)	52	40
Média dos m ² decapados por banho	47 190	35 870
Média dos m ² decapados pela 2 ^a vez por banho	3 182	1 813
m ² não decapados pela 2 ^a vez	44 008	34 057