



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

REDUÇÃO CONTROLADA DO TEOR DE HIDROGÉNIO EM LIGAS DE ALUMÍNIO

ANDRÉ FERREIRA DE OLIVEIRA

DISSERTAÇÃO REALIZADA SOB A SUPERVISÃO DO:

PROFESSOR DOUTOR CARLOS ALBERTO SILVA RIBEIRO,
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS DA
FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

E DO ENG.º HÉLDER COSTA
RECIAL – RECICLAGEM DE ALUMÍNIOS, S.A.

PORTO, JULHO DE 2010

<i>CANDIDATO</i>	<i>André Ferreira de Oliveira</i>	<i>Código</i>	040508002
<i>TÍTULO</i>	Redução controlada do teor de hidrogénio em ligas de alumínio		
<i>DATA</i>	29 de Julho de 2010		
<i>LOCAL</i>	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Sala F-103 – 10.00h		
<i>JÚRI</i>	<i>Presidente</i>	Professor Doutor Henrique Manuel C. Martins dos Santos	DEMM/FEUP
	<i>Arguente</i>	Professor Doutor Fernando António Portela Sousa Castro	DEM/EEUM
	<i>Orientador</i>	Professor Doutor Carlos Alberto Silva Ribeiro	DEMM/FEUP

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao Professor Carlos Silva Ribeiro pela orientação prestada e ao Eng.º Bernardo Macedo pela oportunidade de trabalhar na área da reciclagem de alumínio.

Devo também agradecer aos contactos na empresa, Eng.º Hélder Costa, Eng.º Francisco Estima e Sr. Bizarro, pela sua partilha de conhecimentos, tempo despendido e ajuda prestada na realização deste trabalho, bem como a toda a equipa da RECIAL, pelo tempo e paciência que disponibilizaram sempre que necessitei.

Gostaria de ter uma palavra de consideração, por todos os colegas com que tive o prazer de estar em contacto durante todos estes meses.

Por último, mencionarei a minha família, que sempre me apoiou para conseguir terminar este trabalho.

A todos, uma palavra de reconhecimento

PRÓLOGO

Este trabalho tem uma breve introdução ao processo de reciclagem de alumínio a partir de sucatas, onde se dá particular atenção ao processo produtivo da empresa.

O objectivo deste trabalho, que foi proposto pela empresa RECIAL – Reciclagem de alumínios, S.A., foi estimar a quantidade de gases dissolvidos nos banhos metálicos de alumínio e adequar a técnica de remoção para níveis tecnicamente apropriados. Também associado a esta análise foi estabelecido o tempo tecnicamente ideal de desgasificação dos banhos nos fornos de afinação, com base na estima da quantidade de gases em função do tempo de desgasificação.

Para os fornos de manutenção dos banhos metálicos de 10 toneladas foi determinado um tempo tecnicamente aceitável de 9 minutos de desgasificação. Ao fim deste tempo o banho metálico de alumínio encontra-se num nível admissível de teor de gases.

No final do trabalho são apresentadas sugestões sobre trabalhos futuros na área da reciclagem de sucatas de alumínio.

ABSTRACT

This work is a brief introduction to the recycling process of several types of aluminium scraps, considering the productive process of the company.

The main aim of this work, which has been proposed by the RECIAL – Reciclagem de alumínio, S.A. company was to forecast the amount of dissolved gas into molten aluminium alloys and development a removal technique to an adequate technical amount.

As a result was the suitable degassing time of the molten alluminium alloys melts in the refining furnaces, based upon the forecast of the amount of dissolved gas and treatment time.

For furnaces maintenance of the baths of 10 tons of metal was determined technically acceptable time of 9 minutes of degassing. After this time the aluminium melt is at a permissible level of gas content.

At the end of the work, are presented suggestions on future work in the area of recycling scrap aluminium.

ÍNDICE

Agradecimentos.....	i
Prólogo.....	ii
Abstract.....	iii
Índice.....	iv
Índice de figuras.....	vi
Índice de tabelas.....	viii
1 Objectivo.....	1
2 Introdução.....	1
2.1 Apresentação da empresa.....	1
2.2 Descrição do processo.....	3
2.2.1 Recepção, escolha e pesagem da sucata.....	4
2.2.2 Fusão da sucata e afinação da liga.....	5
2.2.3 Lingotagem e Empacotamento.....	10
2.3 Ligas de alumínio para fundição.....	11
2.4 Problemas da fusão das sucatas de alumínio.....	13
2.5 Solubilidade do hidrogénio no alumínio.....	14
2.6 Origem do hidrogénio dissolvido no alumínio.....	16
2.7 Método de desgasificação.....	20
2.7.1 Tipos de gases usados.....	22
2.7.2 Eficiência da desgasificação.....	23
2.7.3 Procedimento de desgasificação da empresa.....	25
2.8 Densidade.....	26
2.9 Estima do teor de hidrogénio – Straube-Pheiffer.....	27
3 Técnica experimental.....	30
3.1 Equipamento utilizado.....	30
3.2 Procedimento experimental.....	31

4	Resultados e Discussão	35
4.1	Análise da sucata.....	36
4.2	Cálculo da densidade	38
4.3	Ensaio de Straube-Pheiffer	45
4.4	Análise PAQI.....	52
4.4.1	Análise quantitativa	52
4.4.2	Imagens PAQI	54
4.5	Microestruturas	55
5	Conclusões	58
6	Sugestões para trabalhos futuros	58
	Referências Bibliográficas	59
	Anexos	I

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 – Fluxograma do processo produtivo da empresa.....	3
FIGURA 2 – Sucata velha a granel.	4
FIGURA 3 – Sucata nova enfardada.	4
FIGURA 4 – Sucata de cárter.....	4
FIGURA 5 – Representação em corte de um forno rotativo.	6
FIGURA 6 – Forno rotativo de 10 toneladas.	6
FIGURA 7 – Cortes do forno de soleira (inclinada)	7
FIGURA 8 – Forno de soleira (inclinada) de 3 toneladas.	7
FIGURA 9 – Forno de revérbero de soleira molhada.	8
FIGURA 10 – Forno de revérbero de soleira seca/inclinada.....	8
FIGURA 11 – Forno de manutenção/afinação de 10 toneladas (traseira).....	9
FIGURA 12 – Forno de manutenção/afinação de 10 toneladas (frente).	9
FIGURA 13 – Corte longitudinal do forno de revérbero	9
FIGURA 14 – Corte transversal do forno de revérbero	9
FIGURA 15 – Remoção da escória de afinação com a espátula (Skimmer).....	9
FIGURA 16 – Lingoteira.....	10
FIGURA 17 – Pormenor da lingoteira.	10
Figura 18 – Lingotes.....	11
FIGURA 19 – Solubilidade do hidrogénio no alumínio puro e em duas ligas em função da temperatura.....	17
FIGURA 20 – Mecanismo para dissolução do hidrogénio nos banhos de alumínio com atmosfera húmida	19
FIGURA 21 – Esquema de um mecanismo de desgasificação	20
FIGURA 22 – Sistema de desgasificação com lança rotativa	21
FIGURA 23 – Unidade de desgasificação.....	21
FIGURA 24 – Comparação da eficiência entre processos de desgasificação	25
FIGURA 25 – Unidade de desgasificação.....	26
FIGURA 26 – Processo de desgasificação utilizado na empresa.....	26
FIGURA 27 – Esquema do aparelho de vácuo.....	29
FIGURA 28 – Zonas onde foram retiradas as amostras.....	30
FIGURA 29 – Aparelho de solidificação em vácuo.....	30
FIGURA 30 – Cadinhos usados.	30

FIGURA 31 – Esquema para determinar massa aparente.	31
FIGURA 32 – Fluxograma do procedimento experimental.	31
FIGURA 33 – Procedimento para determinar o volume da amostra.	33
FIGURA 34 – Ensaio para determinar a massa aparente da amostra.	34
FIGURA 35 – Gráfico densidade em função do tempo de desgasificação	40
FIGURA 36 – Gráfico densidade (princípio de Arquimedes) em função do tempo de desgasificação.	44
FIGURA 37 – Diagrama de fase Al-Si-Cu.	45
FIGURA 38 – Gráfico volume de gás em função do tempo de desgasificação.	48
FIGURA 39 – Gráfico volume de gás em função do tempo de desgasificação.	51
FIGURA 41 – Sequência de imagens do PAQI em função do tempo de desgasificação (ampliação 5X).	54
FIGURA 42 – Sequência de microestruturas vs tempo de desgasificação.	55
FIGURA 43 – Sequência de microestruturas vs tempo de desgasificação.	56
FIGURA 44 – Sequência de microestruturas com o tempo de desgasificação.	57

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 – Ligas produzidas pela empresa.	2
TABELA 2 – Principais impurezas das sucatas	5
TABELA 3 – Dimensões do forno de afinação de 10 toneladas.	9
TABELA 4 – Dimensões dos lingotes.....	10
TABELA 5 – Famílias de ligas de alumínio.....	11
TABELA 6 – Composição química da liga $AlSi_9Cu_3$	12
TABELA 7 – Solubilidade do hidrogénio em ligas binárias de alumínio	15
TABELA 8 – Misturas usadas na desgasificação dos banhos metálicos de alumínio.....	23
TABELA 9 – Matérias-primas usadas.....	36
TABELA 10 – Matérias-primas usadas (continuação).....	37
TABELA 11 – Cálculo das densidades das amostras.....	38
TABELA 12 – Cálculo das densidades das amostras (continuação).....	39
TABELA 13 – Valores médios da densidade das amostras.	40
TABELA 14 – Cálculo da densidade pelo princípio de Arquimedes.....	42
TABELA 15 – Cálculo da densidade pelo princípio de Arquimedes (continuação).....	43
TABELA 16 – Médias das densidades calculadas pelo princípio de Arquimedes.....	44
TABELA 17 – Valores máximos e mínimos da densidade nos dois métodos.	44
TABELA 18 – Cálculo do volume de gás das amostras.....	46
TABELA 19 – Cálculo do volume de gás das amostras (continuação).....	47
TABELA 20 – Valores médios do volume de gás das amostras.	48
TABELA 21 – Cálculo do volume de gás das amostras (princípio de Arquimedes).	49
TABELA 22 – Cálculo do volume de gás das amostras (princípio de Arquimedes) (continuação).....	50
TABELA 23 – Valores médios do volume de gás das amostras.	51
TABELA 24 – Valores máximos e mínimos do volume de gás nos dois métodos.	52
TABELA 25 – Médias da percentagem de poros dos diferentes tempos de desgasificação. 52	
TABELA 26 – Média da circularidade dos diferentes tempos de desgasificação.....	53
TABELA 27 – Médias dos comprimentos dos diferentes tempos de desgasificação.....	53

1 OBJECTIVO

O objectivo deste trabalho, que foi proposto pela empresa RECIAL – Reciclagem de alumínio, S.A., foi adequar a técnica de remoção dos gases existente com base na estima do teor de gases dissolvidos de modo que fosse economicamente compatível com o processo instalado na empresa e estabelecer o tempo ideal de desgasificação nos fornos de afinação.

2 INTRODUÇÃO

Este trabalho surgiu da necessidade de aumentar a eficiência de desgasificação dos banhos metálicos de alumínio. Estes problemas traduziam-se no aparecimento de porosidades em zonas do lingote, que não devem aparecer. Deste modo, foi necessária toda uma aprendizagem do processo de reciclagem, com particular importância para as etapas de fusão e desgasificação das ligas de alumínio.

Para desenvolver este trabalho foi definido um procedimento para a estima do teor de gases dissolvidos tendo por base o teste de Straube-Pheiffer e o princípio de Arquimedes. Inicialmente foram retiradas amostras do banho com diferentes tempos de desgasificação e após solidificação em vácuo (teste Straube-Pheiffer) foi determinada a sua densidade por dois métodos (densidade relativa e absoluta). Através dos valores da densidade e recorrendo a equações analíticas foi possível estimar o volume de gases dissolvidos nas amostras recolhidas.

2.1 APRESENTAÇÃO DA EMPRESA [1]

A empresa Recial – Reciclagem de Alumínios S.A. foi criada em Janeiro de 2005, tendo laborado nas instalações da freguesia de Dume, no concelho de Braga, até 31 de Maio de 2008, com uma capacidade instalada de 500 toneladas de lingote/mês.

Em Novembro de 2008 teve início a laboração na nova unidade situada no Parque Empresarial de Lanheses, em Viana do Castelo, com uma capacidade instalada de 1.000 toneladas de lingote/mês.

A sua actividade consiste na transformação de sucatas de alumínio, novas e velhas, em lingotes de alumínio reciclado, de qualidade certificada, para utilização nas indústrias de fundição de alumínio.

A actividade da Recial encontra-se sujeita a regulamentação ambiental bastante restritiva, nomeadamente em termos de valores limite de emissão que são estabelecidos com base nas Melhores Tecnologias Disponíveis (MTD) e consumados na licença ambiental atribuída.

O sistema de tratamento de efluentes gasosos é dos mais sofisticados do mercado e o processo de tratamento é composto por 3 etapas fundamentais:

- Ciclone para remoção de partículas de maior dimensão;
- Adição de carvão activado e cal para neutralização de contaminantes químicos;
- Sistema de filtros por mangas para remoção de partículas de menor dimensão.

Em 2008 a Recial iniciou a implementação de um Sistema de Gestão de Qualidade, sendo desde Julho de 2009 certificada pela Norma: NP EN ISO 9001:2008.

Dispõe de uma área total próxima de 7650 m², sendo a área coberta 3000 m². O pavilhão industrial encontra-se dividido em 3 áreas:

- Armazenamento de matérias-primas;
- Produção, onde se encontram os fornos de fusão e manutenção;
- Produto Acabado.

A Recial produz diversos tipos de ligas, segundo normas de referência, conforme se apresenta na Tabela 1.

TABELA 1 – Ligas produzidas pela empresa.

Família	Referência DIN 1706	Família	Referência DIN 1706
AlSi₇Mg	EN AC 42000	AlSi₁₂Cu(Fe)	EN AC 47000 EN AC 47100
AlSi₁₀Mg	EN AC 43100 EN AC 43200 EN AC 43300 EN AC 43400	AlSi	EN AC 44100 EN AC 44300 EN AC 44400
AlSi₉Cu₃	EN AC 46000 EN AC 46100 EN AC 46500	AlSi₅Cu	EN AC 45000

As principais ligas fabricadas são: AlSi₉Cu₃, AlSi₁₀Mg e AlSi₁₂Cu(Fe). Sendo os principais clientes da empresa o sector automóvel.

2.2 DESCRIÇÃO DO PROCESSO

O processo produtivo da Recial é resumidamente descrito pelo seguinte fluxograma:

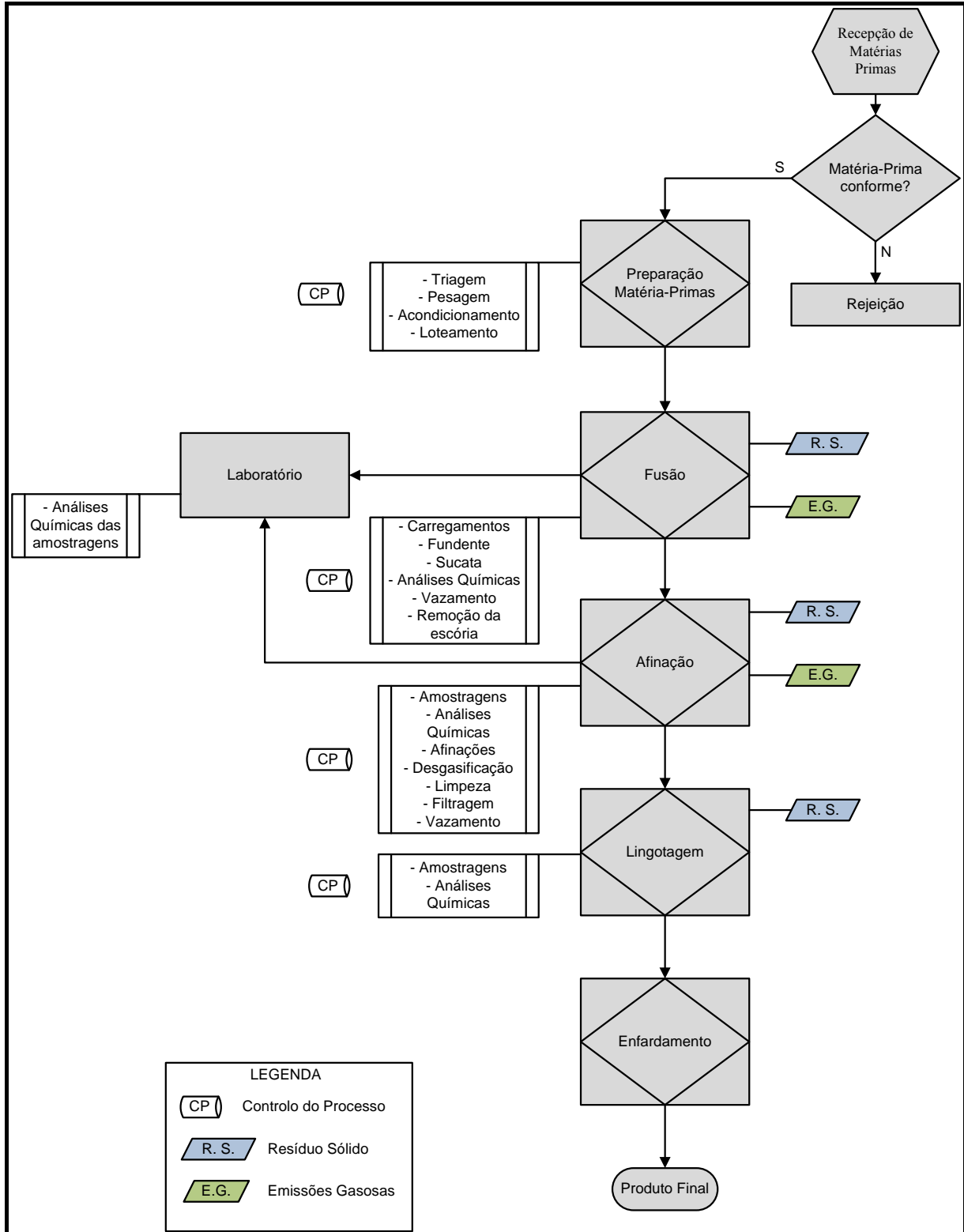


FIGURA 1 – Fluxograma do processo produtivo da empresa.

2.2.1 RECEPÇÃO, ESCOLHA E PESAGEM DA SUCATA

Na recepção das sucatas os camiões são inicialmente pesados, sendo posteriormente descarregada a sua carga num local apropriado, devidamente separado da restante sucata.

São utilizados essencialmente 3 tipos de sucatas de alumínio:

- “Novo” (Enfardado e prensado);
- “Velho” (Enfardado e prensado ou a granel, sendo este último alvo de uma separação manual devido à composição química ser variável);
- Cárter de Automóvel (separação manual).

Dentro desta subdivisão existe uma classificação de cada tipo de sucata (ver Anexo X).



FIGURA 2 – Sucata velha a granel.



FIGURA 3 – Sucata nova enfardada.



FIGURA 4 – Sucata de cárter.

As sucatas são armazenadas por fornecedor e tipo de sucata. A cada carga que é descarregada no armazém é dado o número de partida. As partidas contêm o fornecedor, o tipo de sucata e a quantidade. Unicamente as sucatas de tipo alumínio “novo” e “velho” vêm prensadas, sendo depois colocadas em paletes e pesadas. O alumínio do tipo “velho” também pode vir a granel, sendo alvo de uma separação manual. O cárter de alumínio, após ser separado, é colocado em caixotes e pesado. As impurezas (chumbo, zinco, magnésio, plástico e matéria-prima contaminada por exemplo com água ou terra) provenientes da separação manual da sucata, são colocadas em sacos “big-bag” e estes são pesados para posteriormente serem devolvidos ao fornecedor (Tabela 2).

Apesar de a sucata sofrer uma primeira separação por parte dos fornecedores, esta é sujeita a uma nova separação levada a cabo por técnicos da Recial, mais minuciosa, aquando da sua

chegada com o objectivo de retirar impurezas prejudiciais ao processo, como por exemplo sucatas ferrosas e outros elementos. Desta nova separação, resultam diversos tipos de sucatas de alumínio que poderão ser utilizados nos diversos fornos e em diferentes fases do processo produtivo, mediante o tipo de liga que se pretende produzir.

TABELA 2 – Principais impurezas das sucatas [2].

Sucata	Impurezas
Cabos	Fe, Zn, Cu e materiais orgânicos
Material estampado	Verniz, tinta e materiais orgânicos
Chapas de alumínio	Fe, Cu, plásticos
Folhas de alumínio	Óleo, restos de alimentos
Aparas	Óleo, Fe, Zn, Cu, Si
Tubos	Fe
Radiadores	Fe, Sn, Pb
Pistões	Fe, Cr, óleo, material orgânico
Latas de bebida	Fe, Cu, Mg, verniz

2.2.2 FUSÃO DA SUCATA E AFINAÇÃO DA LIGA

As matérias-primas são fundidas em fornos de fusão, que podem ser de dois tipos [1]:

- Fornos Rotativos (3 e de 10 toneladas);
- Forno de soleira (inclinada) (3 toneladas, para a fusão de sucatas de peças fundidas, permitindo a remoção do ferro).

O forno rotativo consiste num cilindro em aço revestido com um refractário, suportado por rolamentos, que permitem a rotação do cilindro (Figura 5). Numa das extremidades têm um queimador que faz a combustão do fuel-óleo. O sistema de queimadores é ar-fuel onde o comburente é o ar atmosférico. O corpo do forno tem um movimento de rotação durante a fusão, o que permite reduzir para metade o tempo de fusão relativamente ao caso do banho estar imobilizado, e, por outro lado, evita o sobreaquecimento do refractário e a oxidação do banho [3].

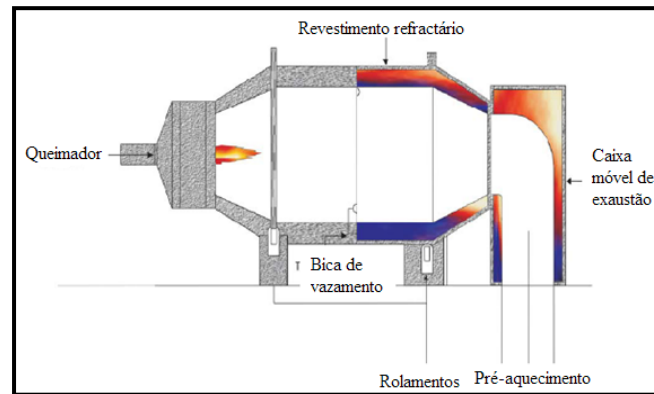


FIGURA 5 – Representação em corte de um forno rotativo [3].

A rotação do forno é lenta durante as fases iniciais do processo de fusão, para evitar danos no refractário, provenientes de grandes pedaços de sucata ou jorra, quando o banho metálico se começa a formar, a velocidade é aumentada para cerca de 7 a 8 m/minuto.

No forno rotativo de 3 e 10 toneladas a fusão da sucata é feita com a adição de um fundente (mistura de cloreto de sódio, cloreto de potássio e fluoreto de cálcio em proporção adequada) de modo a proteger o banho metálico da chama e promover a formação de escória com retenção de impurezas (tintas, óleos, ferro, etc.) e livre de alumínio [3].



FIGURA 6 – Forno rotativo de 10 toneladas.

No forno de soleira (inclinada) efectua-se a fusão de sucatas de peças fundidas, no qual irá ser removido, por decantação, o ferro presente nas peças [4].

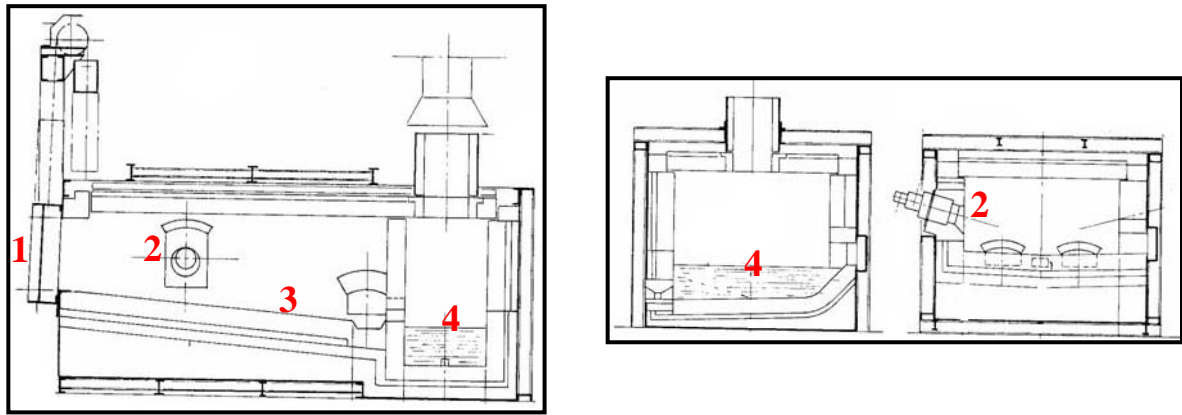


FIGURA 7 – Cortes do forno de soleira (inclinada) [4].

1 – Porta de carregamento; 2 – Queimador; 3 – Posicionamento da sucata sólida; 4 – Banho metálico de alumínio.



FIGURA 8 – Forno de soleira (inclinada) de 3 toneladas.

Após concluída a fusão das cargas em ambos os fornos (rotativo 10 e de soleira), o banho metálico é vazado através de caleiras para o forno de afinação (forno de revérbero) de 10 toneladas no qual, após análise química, serão adicionados elementos essenciais para a formulação química final da liga (silício, cobre, ferro e magnésio), permitindo assim a correção e ajuste da composição química do banho metálico para a gama de teores pretendidos [1]. A fusão das sucatas é feita em dois fornos diferentes devido às sucatas utilizadas em cada um deles. No forno de soleira só é fundida sucata do tipo cárter por esta conter um elevado teor de ferro. Este forno é o único que garante uma menor contaminação de ferro na liga. Nos fornos rotativos são fundidos os restantes tipos de sucatas.

Os fornos de revérbero para manutenção de ligas de alumínio, são construídos em chapa de aço carbono soldadas e reforçadas, possuindo uma camada material refractário de baixo teor de alumina. Funciona com queimadores a fuel-óleo com controlo de temperatura, na câmara de manutenção de alumínio líquido. Tem um sistema de basculamento hidráulico para o posterior vazamento para as lingoteiras. O aquecimento é feito pela chama que incide directamente sobre a superfície livre do banho metálico. Os fornos de revérbero são distinguidos em dois tipos: por soleira molhada ou por soleira seca/inclinada. No forno de soleira molhada a carga sólida é carregada directamente para o banho metálico, os produtos de combustão estão em contacto directo com o topo do banho de metal, e a transferência de calor é conseguida através da combinação de convecção e radiação. Num forno de soleira seca, a carga de metal sólido é posicionada numa soleira inclinada que está acima do nível do banho de modo a que a carga seja completamente envolvida pelos gases quentes. O calor é rapidamente absorvido pela carga sólida, a qual funde, e conseqüentemente escorrega, pela soleira inclinada até ao compartimento de manutenção do banho, deixando para trás as camadas superficiais de óxidos e outras impurezas [5].

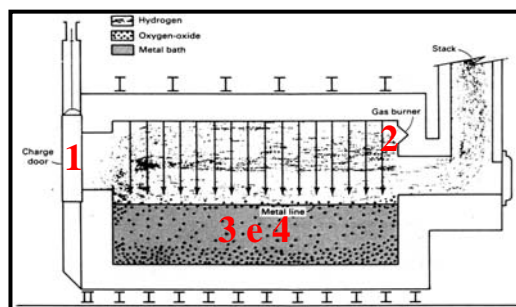


FIGURA 9 – Forno de revérbero de soleira molhada.

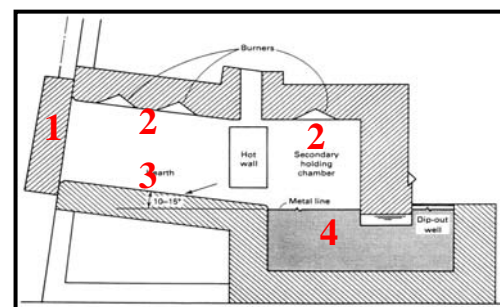


FIGURA 10 – Forno de revérbero de soleira seca/inclinada.

1 – Porta de carregamento; 2 – Queimador; 3 – Posicionamento da sucata sólida; 4 – Banho metálico de alumínio.

Uma vez concluída a correcção da composição química, o banho metálico sofre uma desgasificação para que o hidrogénio e os óxidos presentes no alumínio possam ser removidos, bem como para que ocorra um processo de homogeneização química do banho. A escória formada é retirada do forno através de uma colher metálica iniciando-se de seguida o processo de lingotamento [1].



FIGURA 11 – Forno de manutenção/afinação de 10 toneladas (traseira).



FIGURA 12 – Forno de manutenção/afinação de 10 toneladas (frente).

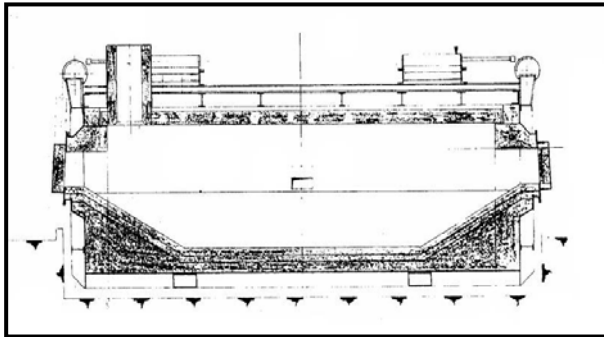


FIGURA 13 – Corte longitudinal do forno de revérbero [4].

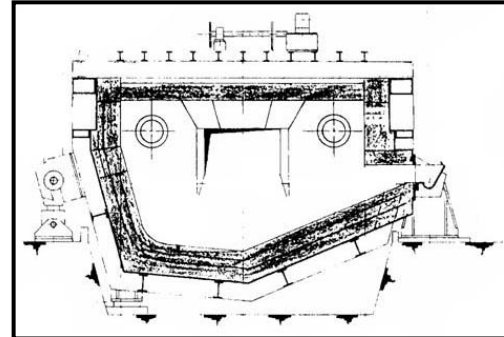


FIGURA 14 – Corte transversal do forno de revérbero [4].

TABELA 3 – Dimensões do forno de afinação de 10 toneladas [4].

Comprimento	5,700 m
Largura ao nível do banho	2,400 m
Capacidade nominal	4,255 m ³
Profundidade máxima do banho	0,53 m



FIGURA 15 – Remoção da escória de afinação com a espátula (Skimmer)

O resíduo produzido nos fornos de afinação de 3 e 10 toneladas (escória de afinação) é reintroduzido novamente no processo. Esta escória é posteriormente inserida nos fornos de fusão pois ainda contém um elevado teor de alumínio. O resíduo dos fornos rotativos de 3 e 10 toneladas (escória salina) é retirado do forno, colocado numa bacia metálica, e após solidificação e arrefecimento, é colocado dentro de um contentor que quando cheio é encaminhado para o destino final mais adequado (aterro devidamente licenciado para o efeito). Os óxidos e ferros recuperados do forno de soleira (inclinada) são colocados dentro de uma bacia metálica e colocados dentro de um contentor. Quando o contentor se encontra cheio, os óxidos e ferro são vendidos a outra entidade [1].

2.2.3 LINGOTAGEM E EMPACOTAMENTO

O banho metálico proveniente dos fornos de afinação é posteriormente vazado para lingoteiras, em ferro fundido, conferindo-lhe assim a forma em como é comercializado – lingote (o qual irá cair por gravidade dentro de caixotes) [1].



FIGURA 16 – Lingoteira.



FIGURA 17 – Pormenor da lingoteira.

Os lingotes produzidos têm dois formatos: 9 Kg e 5Kg (Tabela 4).

TABELA 4 – Dimensões dos lingotes [1].

Comprimento (cm)	Largura (cm)	Altura (cm)
62	10	9
53	7	7

Os lingotes são retirados dos caixotes e colocados de modo a formar vários fardos. Esses são pesados, numerados, pintados e registados segundo a liga produzida. Com base nas

análises efectuadas às ligas é preenchido um certificado de qualidade. Concluídas estas tarefas, inicia-se o seu processo de expedição [1].



Figura 18 – Lingotes.

2.3 LIGAS DE ALUMÍNIO PARA FUNDIÇÃO

As ligas de alumínio para fundição têm vindo a ser desenvolvidas no sentido de melhorar quer as propriedades relacionadas com o vazamento, como a fluidez e a capacidade de alimentação da cavidade moldante, quer propriedades como a resistência mecânica, a ductilidade e a resistência à corrosão. Por isso, as composições destas ligas são muito diferentes das composições das ligas de alumínio para trabalho mecânico. As ligas de alumínio para fundição são classificadas nos Estados Unidos da América de acordo com a nomenclatura da “*Aluminum Association*”. Nesta classificação, as ligas de Alumínio para fundição estão agrupadas segundo os principais elementos de liga que contêm, usando-se um número de quatro dígitos com um ponto entre os últimos dois dígitos, tal como se indica na tabela seguinte [6]:

TABELA 5 – Famílias de ligas de alumínio [6].

	Série
Alumínio, 99%	1xx.x
Cobre	2xx.x
Silício com adições de cobre e/ou magnésio	3xx.x
Silício	4xx.x
Magnésio	5xx.x
Série livre	6xx.x
Zinco	7xx.x
Estanho	8xx.x
Outros elementos	9xx.x

2.3.1.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA LIGA

As ligas de alumínio mais utilizadas em fundição são as de silício e cobre. Os teores variam amplamente, de modo que o cobre predomina em algumas ligas e silício em outras. O cobre contribui para melhorar a maquinabilidade e o silício melhora a fluidez.

A liga utilizada neste estudo é a $AlSi_9Cu_3$, cuja composição é a seguinte:

TABELA 6 – Composição química da liga $AlSi_9Cu_3$.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Ti	Cr	Pb	Sn
8,0-11,0	0,6-1,2	2,0-3,5	0,1-0,5	0,1-0,5	1,2	0,3	0,15	0,1	0,1	0,25

2.3.1.2 EFEITO DOS ELEMENTOS DE LIGA [7]

Cobre

As primeiras e mais usadas ligas de alumínio são as que contém 4 a 10% cobre. O cobre melhora substancialmente a resistência mecânica, a dureza e a maquinabilidade nos fundidos de ligas de alumínio, com e sem tratamento térmico. Ligas com 4 a 6%Cu são facilmente tratáveis termicamente. Em geral, o cobre melhora a resistência à corrosão, mas também diminui a fluidez.

Ferro

Este elemento diminui a tendência de adesão da liga nos moldes permanentes. Contudo o aumento do teor de ferro diminui substancialmente a ductilidade. O ferro reage, e forma várias fases insolúveis nas ligas de alumínio, estas fases são responsáveis pelo seu endurecimento.

Magnésio

É o elemento chave para o aumento da dureza e da resistência mecânica nas ligas de Al-Si tratáveis termicamente. A fase de endurecimento Mg_2Si apresenta uma solubilidade limite correspondente a aproximadamente 0,7% Mg, para além da qual não ocorre nem endurecimento nem amaciamento da matriz. Nas ligas de Al-Si usa-se normalmente teores de Mg entre 0,07 a 0,4%.

As ligas binárias de Al-Mg são largamente usadas em aplicações que requerem um aspecto superficial brilhante e boa resistência à corrosão, assim como uma boa relação entre resistência mecânica e ductilidade. As composições destas ligas varia entre 4 a 10%, acima de 7% a liga é tratável termicamente.

Também induz um aumento da resistência à corrosão do alumínio e favorece a sua possibilidade de soldadura.

Manganês

É considerado normalmente uma impureza nas composições da liga. O manganês é um elemento de extrema importância de ligas em bruto de fundição. Na ausência de endurecimento por deformação plástica, o manganês não oferece nenhum efeito benéfico nas ligas de alumínio. Contudo, existem evidências que, uma grande fracção volúmica de $MnAl_6$ em ligas que contem mais de 0,5 % de Mn, pode influenciar sanidade interna do fundido. O manganês pode também ser empregue de modo a melhorar a resposta ao acabamento químico e anodização.

Silício

A adição de silício ao alumínio melhora drasticamente a fluidez, a resistência à fissuração a quente e as características de alimentação. Estas são as ligas de alumínio mais usadas em fundição. A sua composição estende-se até 25% Si.

Para processos de fundição de arrefecimento lento (ex: gesso, cera perdida e areia), o teor em Si é de 5 a 7%, para moldes permanentes 7 a 9%, e para fundição injectada 8 a 12%.

Zinco

O zinco por si só em adição às ligas de alumínio não traz grandes benefícios. No entanto quando acompanhado por adições de cobre e ou magnésio as ligas podem ser tratadas termicamente ou envelhecidas naturalmente [9]. Nas ligas de alumínio são utilizados teores até 3% em peso.

2.4 PROBLEMAS DA FUSÃO DAS SUCATAS DE ALUMÍNIO

O processo de fusão do alumínio apresenta alguns desafios. Tem certas características que causam reacções, que devem ser controladas, para produzir um produto final de qualidade satisfatória.

Durante a fusão das ligas de alumínio, é importante evitar temperaturas excessivamente altas e tempos de fusão prolongados. Estes factores melhoram as condições de absorção de gases e formação de escórias. A fusão nunca deve ser a temperaturas muito elevadas, pelo contrário a mais baixa possível, que não deve exceder os 760°C.

A temperatura elevada, o alumínio combina rapidamente com o oxigénio para formar óxidos, e durante a fusão, a quantidade de óxidos aumenta com a temperatura. Devido à densidade das ligas de alumínio ser próxima à dos óxidos, pode ocorrer facilmente a mistura dos dois, quando efectuada a fusão, caso não sejam tomadas precauções. Assim, a agitação do banho metálico deve ser reduzida ao mínimo possível.

Outro problema enfrentado na fusão é o facto de o banho de alumínio absorver certos gases, dos quais o hidrogénio é o mais relevante. Num forno de fusão que utilize a chama directa, existe o risco de absorção de gás, derivado do vapor de água gerado no processo de combustão. As matérias-primas podem também conter hidrogénio, por terem humidade ou outros contaminantes. A atmosfera e as características da chama do queimador são factores importantes a considerar. Foi constatado que a camada de óxido, que geralmente cobre o banho metálico, oferece uma protecção considerável contra a absorção de gases. Enquanto essa camada permanecer intacta, a absorção de gases é relativamente baixa.

Um problema que geralmente surge na fusão de ligas de alumínio é a tendência para a formação de óxidos na interface metal-refractário. Esta acumulação reduz capacidade do forno e a vida útil do refractário. Há ainda outros efeitos negativos imediatos deste facto: a contaminação das ligas e o aumento do consumo de combustível para eliminar tais óxidos. Podem ser usados compostos especiais de limpeza do forno para remover os óxidos e impedir a formação de óxidos nas paredes do forno no futuro. Mas a medida mais económica é a prevenção, ou seja uma boa política de limpeza diária [8].

2.5 SOLUBILIDADE DO HIDROGÉNIO NO ALUMÍNIO

Solubilidade no alumínio puro

O hidrogénio é o único gás com uma solubilidade significativa nos banhos de ligas de alumínio [9]. Devido a este facto, como resultado praticamente todos os banhos de ligas de alumínio contêm hidrogénio dissolvido. Este gás promove a formação de porosidade nas peças fundidas. Contudo, é necessário um esforço considerável no controlo e remoção do hidrogénio dissolvido no banho metálico.

A solubilidade do hidrogénio a 1 atm no alumínio puro rege-se segundo a equação determinada por Opie e Grant [9]:

$$\log_{10} S = \frac{-2550}{T} + 2,62$$

Aqui, a solubilidade, S, é expressa em mililitros por 100 gramas de alumínio, em condições normais de temperatura e pressão, e a temperatura, T, é expressa em Kelvin.

A solubilidade do hidrogénio tem três características distintas [9]:

1. A forte dependência da temperatura no estado líquido, o que implica aumentos de teor de hidrogénio com o aumento da temperatura. Na verdade, a solubilidade do hidrogénio dobra a cada aumento de 110°C, acima da temperatura de fusão;

2. Uma baixa solubilidade a temperaturas inferiores à de fusão;
3. Uma grande mudança na solubilidade no ponto de fusão.

Os dois últimos factores significam que praticamente toda a quantidade de hidrogénio que está presente no banho fica em solução sólida sobressaturada após a solidificação da liga. Portanto, o hidrogénio acumula-se na interface líquido-sólido e pode ocorrer a formação de porosidades.

Solubilidade em ligas de alumínio

A adição de elementos de liga ao banho metálico leva a mudanças na solubilidade do hidrogénio. Apesar das curvas de solubilidade se manterem basicamente semelhantes, alguns elementos como o silício, zinco, cobre e manganês diminuem a solubilidade, enquanto outros, como o magnésio, titânio, níquel e lítio a aumentam. Os elementos de liga mais importantes na solubilidade em ligas de fundição são, naturalmente, cobre e silício. As relações de solubilidade de algumas ligas Al-Cu e AlSi são apresentadas na Tabela 7 [9].

TABELA 7 – Solubilidade do hidrogénio em ligas binárias de alumínio [9].

Liga	Solubilidade (ml/100g Al)
Al-2%Cu	$\log_{10} S = \frac{-2950}{T} + 2,90$
Al-4%Cu	$\log_{10} S = \frac{-3050}{T} + 2,94$
Al-8%Cu	$\log_{10} S = \frac{-3150}{T} + 2,94$
Al-16%Cu	$\log_{10} S = \frac{-3150}{T} + 2,83$
Al-32%Cu	$\log_{10} S = \frac{-2950}{T} + 2,57$
Al-2%Si	$\log_{10} S = \frac{-2800}{T} + 2,79$
Al-4%Si	$\log_{10} S = \frac{-2950}{T} + 2,91$
Al-8%Si	$\log_{10} S = \frac{-3050}{T} + 2,95$
Al-16%Si	$\log_{10} S = \frac{-3150}{T} + 3,00$

A solubilidade de equilíbrio do hidrogénio em ligas de alumínio para fundição varia entre 0,6 a 1 ml/100g de alumínio, dependendo da liga e da temperatura [9]. É, no entanto, extremamente raro encontrar banhos com estes níveis de hidrogénio. Por exemplo, na refusão de lingotes de alumínio, geralmente contém entre 0,2 a 0,3 ml/100g de alumínio [9].

Infelizmente, mesmo os níveis normais de hidrogénio encontrados são demasiado elevados na maioria dos casos, assim é recomendado um processo de desgasificação seja empregue [9].

2.6 ORIGEM DO HIDROGÉNIO DISSOLVIDO NO ALUMÍNIO

O hidrogénio dissolvido no banho metálico produz porosidades aquando da sua solidificação. A temperatura do banho metálico determina a quantidade de hidrogénio absorvido [8]. Quando a temperatura baixa, a pressão interna do hidrogénio cresce até atingir o valor da pressão hidrostática [11].

O hidrogénio molecular seco, a temperaturas moderadas, não é considerado uma grande fonte de bolhas nos banhos de alumínio, em virtude do seu baixo grau de dissociação. No entanto, se átomos de hidrogénio forem produzidos à superfície do banho por reacção com a humidade, a pressão parcial efectiva do hidrogénio atómico poderá ser muito alta, resultando numa solubilidade maior. Uma fonte de átomos de hidrogénio é a que resulta da dissociação da água a altas temperaturas ou da redução da água pelo alumínio. Estas duas reacções poderão fornecer mais átomos de hidrogénio que o hidrogénio molecular seco, livre de oxigénio, à mesma temperatura. Então a fonte mais importante de hidrogénio é a humidade e esta pode ser encontrada principalmente nos seguintes itens:

Atmosfera do forno

Os fornos fuel-oléo usados nas fusões de sucatas podem gerar hidrogénio livre, devido à combustão incompleta do combustível.

Materiais da carga

Os lingotes, as sucatas e os retornos de fundição podem conter óxidos de produtos de corrosão, areias ou outros detritos, e lubrificantes da maquinaria. Todos estes contaminantes são fontes potenciais de hidrogénio através da redução dos compostos orgânicos, ou através da decomposição do vapor de água da humidade contida.

Fluxos

A maioria dos fluxos utilizados no tratamento de alumínio fundido são higroscópicos. A humidade dos fluxos pode resultar na absorção de hidrogénio a partir da decomposição da água pelo alumínio.

Componentes externos (utensílios)

As ferramentas do forno tais como ancinhos, escumadeiras, pás podem fornecer hidrogénio para o banho se não forem mantidos limpos. Óxidos e resíduos de fluxo de tais ferramentas são particularmente as fontes de contaminação porque vai absorver a humidade directamente da atmosfera. Os refractários do forno e das caleiras também são potenciais fontes de hidrogénio, especialmente se os refractários não estão adequadamente sinterizados.

Moldação de vazamento

Se o fluxo de metal for demasiado turbulento durante o processo de vazamento, o ar pode ser aspirado para a cavidade moldante. O excesso de humidade nas moldações pode ser uma fonte de hidrogénio quando a água se transforma em vapor.

O alumínio é conhecido como um metal muito reactivo, e quando está a temperaturas elevadas, acima de 660°C, ocorre a reacção entre este e o vapor água produzindo hidrogénio gasoso. A Figura 19 mostra a solubilidade do hidrogénio no alumínio puro e em duas ligas, à medida que a temperatura aumenta. É possível observar que a temperaturas superior a 660°C a solubilidade do hidrogénio aumenta drasticamente. Acima destas temperaturas, o alumínio reage com vapor de água a temperatura elevada e gera hidrogénio gasoso [10].

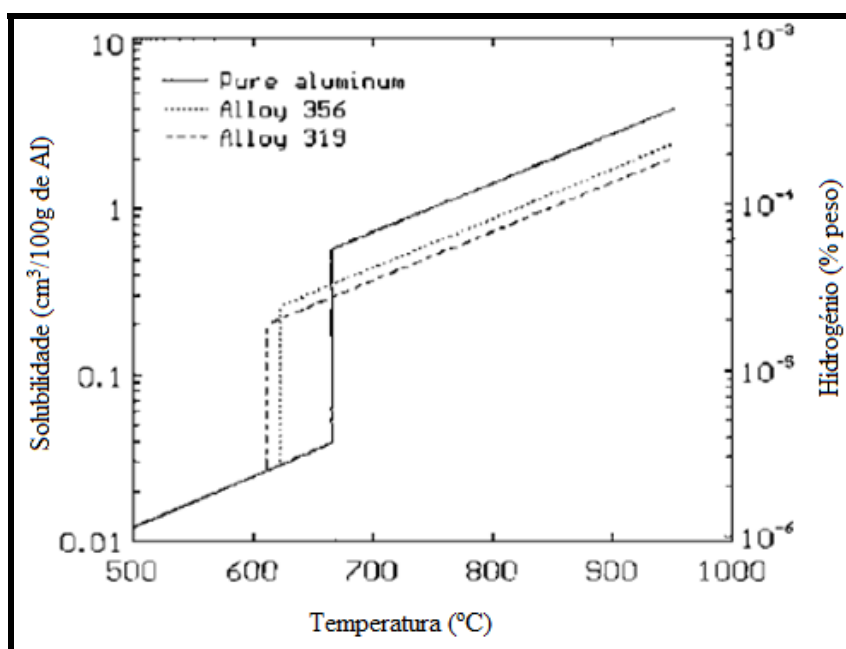
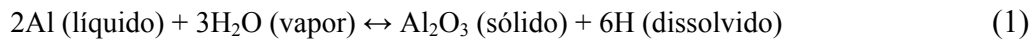


FIGURA 19 – Solubilidade do hidrogénio no alumínio puro e em duas ligas em função da temperatura [10].

Quando uma liga de alumínio arrefece, crê-se que o aparecimento de bolhas se dá por duas razões:

1. Precipitação do hidrogénio existente no banho durante a solidificação;
2. Precipitação do hidrogénio do banho, resultante da reacção da liga de alumínio com a humidade, conforme equação [1]



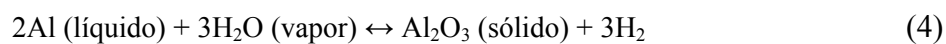
O hidrogénio no alumínio líquido tem uma relação de equilíbrio com o hidrogénio atmosférico como evidencia equação [2]:

$$\text{H} = \frac{1}{2} \text{H}_2 \text{ (gás)} \quad (2)$$

A constante de equilíbrio é apresentada pela equação:

$$K_H = \frac{p_{\text{H}_2}^{\frac{1}{2}}}{f_H [\%H]} \quad (3)$$

onde f_H é o coeficiente de actividade do hidrogénio no alumínio, $[\%H]$ é a concentração de hidrogénio no alumínio e p_{H_2} é a pressão parcial do hidrogénio gasoso na atmosfera. O alumínio reage com o vapor de água a temperaturas elevadas e gera hidrogénio gasoso, segundo a equação [4]:



O hidrogénio gasoso sob a forma gasosa é a fonte do hidrogénio no alumínio. Na composição do banho metálico de alumínio isto ocorre devido à reacção química [Eq. (4)] entre o vapor de água de alta pressão parcial existente, a pressão da atmosfera ambiente e o banho de alumínio. Foi proposto por Engh[10] um modelo numérico designado por “hydrogen pick-up” a partir do vapor de água, que indica que a concentração de hidrogénio no banho de alumínio, que é mantida por muito tempo sob a atmosfera de uma pressão constante do vapor de água ($p_{\text{H}_2\text{O}}$), deve atingir um dado valor calculado[10].

Neste modelo (Figura 20), na interface entre o banho de alumínio e a atmosfera, Engh sugere várias etapas. O vapor de água difunde-se através da camada limite para ser adsorvido na superfície do metal, e as moléculas de hidrogénio reagem com o alumínio [Eq. (4)]. Posteriormente as moléculas de hidrogénio são “desabsorvidas” da superfície, sendo então

dissolvidas para fora da camada limite, e então, as moléculas de hidrogénio dissociam-se na forma de hidrogénio atómico na superfície e os átomos de hidrogénio difundem-se através da camada limite do metal [10].

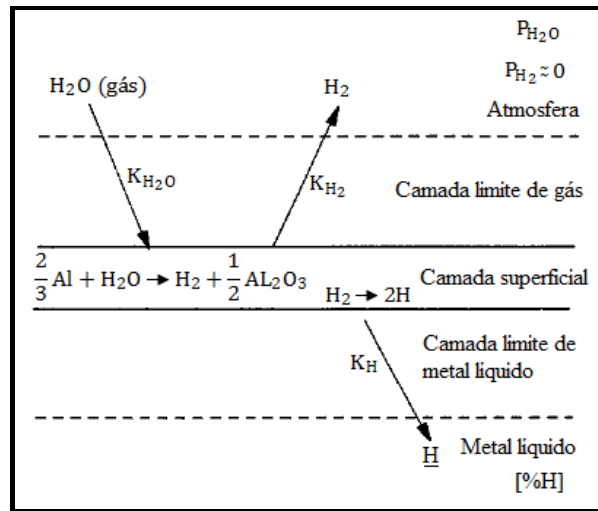


FIGURA 20 – Mecanismo para dissolução do hidrogénio nos banhos de alumínio com atmosfera húmida [10].

Usando o coeficiente de transferência de massa k na interface gás-metal e a constante de equilíbrio para a equação (4), na camada superficial, a pressão parcial de hidrogénio gasoso (p_{H_2}) na interface é dada por:

$$p_{H_2} = \frac{K_{H_2O}}{K_{H_2}} \times p_{H_2O} \quad (5)$$

onde k_{H_2O} e K_{H_2} são os coeficientes de transferência de massa para H_2O e H_2 no gás e p_{H_2O} é a pressão parcial de H_2O na atmosfera. Portanto, a concentração de hidrogénio no alumínio fundido ($[\%H]_1$) é mantida sob a atmosfera de p_{H_2O} por muito tempo, sendo a concentração calculada a partir [1]:

$$[\%H]_1 = \frac{1}{f_H K_H} \sqrt{\frac{K_{H_2O} \times p_{H_2O}}{K_{H_2}}} \quad (6)$$

O coeficiente de transferência de massa K_{H_2O} e K_{H_2} são proporcionais a raiz quadrada dos coeficientes de difusão no ar, D_{H_2O} e D_{H_2} . Logo,

$$[\%H]_1 = \frac{1}{f_H K_H} \sqrt{p_{H_2O} \sqrt{\frac{D_{H_2O}}{D_{H_2}}}} \quad (6)$$

2.7 MÉTODO DE DESGASIFICAÇÃO

A remoção do hidrogénio dos banhos metálicos de alumínio é baseada no equilíbrio e na relação entre o hidrogénio no alumínio e a pressão parcial de hidrogénio na atmosfera ambiente. Assim:

$$[\%H] = \frac{K_H}{f_H} \sqrt{p_{H_2}} \quad (7)$$

Quando o alumínio líquido é mantido sob uma atmosfera de gás inerte, ou em vácuo, a pressão de H_2 é zero, e é injectado um gás inerte que não contém hidrogénio gasoso, o hidrogénio no banho de alumínio difunde-se para a superfície.

O coeficiente de actividade do hidrogénio f_H ($f_H = 1$ para o alumínio puro) pode mudar com a adição de elementos de liga tais como silício, cobre, e magnésio. Portanto, a solubilidade do hidrogénio no alumínio puro é diferente da solubilidade do mesmo nas restantes ligas de alumínio e a facilidade de remoção do hidrogénio dependerá dos elementos de liga presentes.

O procedimento mais corrente para a desgasificação consiste em injectar no banho, por meio de uma lança de grafite (Figura 21), um gás inerte ou uma mistura de gases (Tabela 8). Quando se começa a injectar o gás no banho, este vai borbulhar, e por efeito mecânico, as bolhas do gás vão arrastar as bolhas de hidrogénio, bem como pequenas inclusões, para a superfície. Esta injeção de gás inerte também vai contribuir para uma agitação do banho, melhor homogeneização quer da composição quer da temperatura. Este processo, apesar de simples requer alguns cuidados, um dos quais, o pré-aquecimento da lança, quando se insere no banho, para não haver solidificação local de material [10].

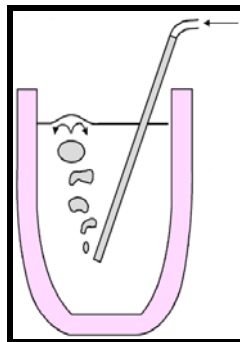


FIGURA 21 – Esquema de um mecanismo de desgasificação [11].

Mais recentemente, com o entendimento das condições termodinâmicas e cinéticas que regem o processo de desgasificação, foi possível o desenvolvimento da injeção de gás inerte por meio de um rotor de grafite. Neste processo, o gás é “fragmentado” pelo movimento

rotativo do rotor gerando um número elevado de bolhas. A eficiência deste processo depende do fluxo do gás inerte e da velocidade de rotação do injetor de gás (100-250 rpm). No processo de dispersão do gás inerte, a eficiência real da remoção do gás deve ser avaliada tanto pela taxa de redução como pelo teor mínimo possível de hidrogénio possibilitado pela pressão parcial do vapor de água à superfície. Como a reacção de desgasificação depende, fundamentalmente, da área total das bolhas do gás, quanto maior a quantidade e menor o tamanho das bolhas, maior é a cinética de desgasificação.

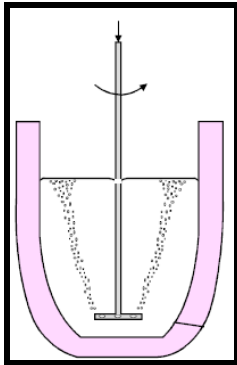


FIGURA 22 – Sistema de desgasificação com lança rotativa [11].

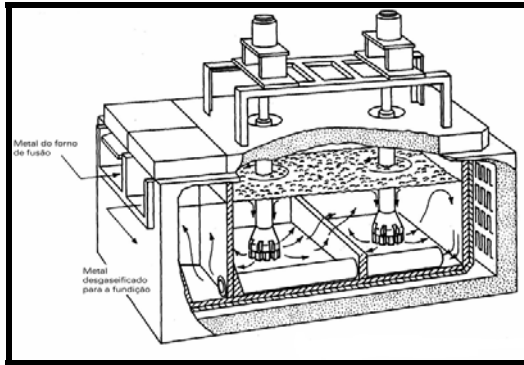


FIGURA 23 – Unidade de desgasificação [6].

Este tratamento pode ser efectuado com gás inerte, gás reactivo, ou uma combinação destes. Praticamente todas as fundições utilizam um processo de desgasificação que se enquadram nesta categoria.

As diferenças entre as várias técnicas de desgasificação reside no tipo de gás que é introduzido e na forma como as bolhas são formadas.

Naturalmente, os gases devem ser completamente livres de água ou então vão introduzir hidrogénio no banho metálico. Entre os mais comuns temos o azoto e árgon. O cloro foi usado extensivamente no passado, mas agora tem sido amplamente interrompido devido à sua toxicidade e aos efeitos corrosivos sobre equipamentos e condutas de ventilação.

O gás de tratamento pode ser introduzido no banho metálico de várias maneiras. O mais simples, mas menos eficaz, é usar uma lança de grafite directamente com um diâmetro exterior de 2,5-5cm, e de diâmetro interno de 0,3cm [9]. As lanças geralmente produzem bolhas de gás de grandes dimensões, com diâmetro da ordem de 2-3cm, que rapidamente vem para a superfície e criam turbulência no banho. Se apenas for usado este sistema, deve ser movido constantemente [8].

A dispersão deve ser com bolhas finas de gás e pode ser alcançado com o uso de uma cabeça em grafite porosa. Estas cabeças têm normalmente cerca de 15cm de diâmetro, e são

aparafusadas na lança de grafite [9]. Ao conectar uma grafite porosa no final da lança esta terá uma dispersão de bolhas finas. No entanto, as bolhas tendem a subir de novo só na área da purga, limitando a quantidade de metal que entra em contacto com o gás usado. A desgasificação completa requer uma grande quantidade de tempo e gás [8].

O impulsor rotativo introduz o gás de tratamento através de um impulsor com uma cabeça especial que gira rapidamente, o fluxo do gás em bolhas muito finas (3-6mm), é então dispersa por todo o banho metálico [9]. Este método produz pequenas bolhas que sobem lentamente para a superfície, permitindo um maior tempo para o hidrogénio reagir. Este método de desgasificação não gera turbulência [8].

A velocidade de rotação e o volume de purga pode variar de acordo com o tamanho do banho.

Nas “wafers” (ou fluxo) de desgasificação, o gás é introduzido no banho sob a forma de pastilhas sólidas. As pastilhas são compostas de substâncias químicas que se decompõem termicamente para libertar as bolhas de gás. Este método é menos controlável devido à decomposição ser muito rápida. A formação de impurezas e a geração de vapores irritantes são promovidos por este método [9].

2.7.1 TIPOS DE GASES USADOS

Os gases utilizados para a desgasificação de alumínio podem ser inertes, como árgon e nitrogénio, significando que eles têm pouca ou nenhuma reacção com o alumínio líquido, ou reactivo, como o cloro, o freon, flúor ou uma combinação destes com um gás inerte. (Uso de cloro puro tem sido amplamente interrompido por causa da toxicidade dos fumos produzidos e os efeitos corrosivos que dispõe sobre superfícies metálicas).

Um dos benefícios para a utilização de um gás reactivo, ou de uma mistura de gás inerte e reactivo, é o efeito de limpeza que os gases reactivos têm no banho metálico. Os gases que são formados alteram a tensão superficial do alumínio para que as inclusões de óxidos destruam as bolhas de hidrogénio e flutuem para fora do banho. Os gases inertes também têm esse efeito de limpeza, mas este é realçado usando algum gás reactivo [8].

Se as bolhas são grandes, a desgasificação tem uma eficiência baixa (desgasificação com lança), ocorre uma melhoria na remoção de hidrogénio com o uso de um gás reactivo. Quando as bolhas são pequenas e a remoção do gás é mais eficiente (desgasificação rotativa), há evidências de que um gás reactivo pode atrasar a remoção de hidrogénio.

Existem diversas misturas gasosas que são utilizadas, como descritas na tabela abaixo.

TABELA 8 – Misturas usadas na desgasificação dos banhos metálicos de alumínio [9].

99% Ar	1%Cl ₂	
90% Ar	10%Cl ₂	
80% N ₂	1%Cl ₂	10%CO
90% N ₂	10%Cl ₂	
70% N ₂	30%Cl ₂	

2.7.2 EFICIÊNCIA DA DESGASIFICAÇÃO

A fim de se avaliar a eficiência de um processo de desgasificação, é necessário considerar o processo e detalhar o modo de remoção do hidrogénio, este pode ser pensado como um processo que requer várias etapas sucessivas:

1. O transporte de hidrogénio contido no banho metálico para a superfície de uma bolha de gás de purga, geralmente por uma combinação de difusão e movimento de convecção;
2. O transporte de átomos de hidrogénio por difusão através de uma camada limite de líquido até à superfície da bolha;
3. Adsorção química de átomos de hidrogénio para a superfície da bolha;
4. Reacção dos átomos de hidrogénio para formar moléculas de gás hidrogénio ($H + H \rightarrow H_2$) e “desabsorção” dessas moléculas na superfície da bolha;
5. Difusão do hidrogénio gasoso no volume da bolha;
6. Remoção do hidrogénio contendo bolhas da superfície do banho metálico.

Dependendo do processo de desgasificação, quase todas as etapas podem controlar a eficiência do processo. As exceções são as etapas 5 e 6. A difusão de espécies gasosas é rápida nos banhos de alumínio a temperaturas de desgasificação (670°-700°C).

Por outro lado, o factor mais importante na determinação da eficiência da desgasificação é o tamanho das bolhas formadas. As bolhas de 5 mm de diâmetro ou menos são as ideais porque as bolhas de grande dimensão baixam a eficiência entre 20 a 30% [9]. Estas tendências podem facilmente ser interpretadas em termos das etapas de desgasificação listadas anteriormente. As bolhas grandes estão muito distantes e, portanto, os átomos de hidrogénio têm dificuldade em difundir para alcançar a superfície da bolha do gás de purga. O sistema é controlado agora por o processo de transporte no alumínio líquido (etapa 1). Como as bolhas são grandes e os átomos de hidrogénio tem dificuldade em alcança-los, estas contêm apenas

uma pequena fracção de hidrogénio do que é termodinamicamente possível, conduzindo a uma baixa eficiência.

Um grande número de pequenas bolhas permite estar mais próximo dos átomos de hidrogénio e terá apenas uma curta distância entre o banho de alumínio e a superfície da bolha. Assim, transpor a fase líquida não é nenhum problema, mas o volume das pequenas bolhas pode ficar rapidamente saturada com hidrogénio (eficiência é de 100%), e a etapa 4 cessa. Neste ponto, a taxa de desgasificação só pode aumentar através do aumento do fluxo de gás de purga.

A eficiência de desgasificação para um dado tamanho de bolha melhora quando concentração de hidrogénio no banho metálico é reduzida.

Além disso, a facilidade de saturação e de transporte de hidrogénio, nas bolhas grandes e pequenas tem outras diferenças importantes que dizem respeito à eficiência de desgasificação. O mais importante é a sua taxa de aumento no banho metálico. As pequenas bolhas flutuam mais lentamente e têm um tempo de contacto maior durante o qual podem absorver hidrogénio. As bolhas grandes sobem rapidamente e assim têm um tempo de contacto muito menor com o banho metálico.

Obviamente, deve ser feito um esforço para tentar produzir a melhor dispersão de bolhas no banho metálico. Assim obtêm-se concentrações de hidrogénio mais baixas num tempo menor, o que vai resultar numa economia no consumo do gás de purga. Num sistema operacional com eficiência de 50%, metade do gás utilizado não absorve hidrogénio e é simplesmente disperso na atmosfera.

Dos quatro métodos comumente utilizados para a introdução de agentes de desgasificação nos banhos de alumínio, a lança de desgasificação e as pastilhas são os mais ineficientes.

A lança produz grandes bolhas, que sobem apenas nas imediações da lança e tendem a colidir e a tornar-se coalescentes, ficando maiores. A decomposição das pastilhas de desgasificação não é controlada, o tamanho da bolha é variável, e as bolhas estão confinadas ao volume de metal em redor.

Um refinamento considerável do tamanho das bolhas é o uso de uma lança porosa. No entanto, as bolhas tendem a subir novamente. O contacto com o volume do banho metálico é limitado, e ocorre a coalescência de bolhas reduzindo a eficiência.

De longe, o padrão mais uniforme de bolhas finas é obtida com um impulsor rotativo. Não só o tamanho da bolha é menor do que nas outras técnicas, mas um rotor de tamanho adequado dispersa as bolhas em toda o banho, atingindo o máximo contacto.

O desempenho da desgasificação de uma lança, lança porosa, e impulsor rotativo é comparado na Figura 24 [9].

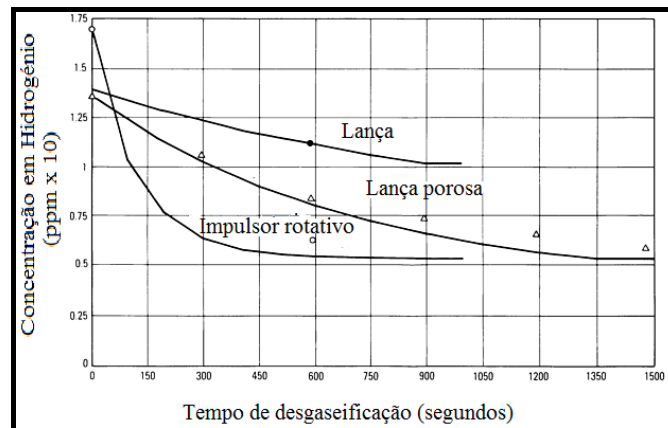


FIGURA 24 – Comparação da eficiência entre processos de desgasificação [9].

As vantagens da desgasificação com impulsor rotativo são evidentes em relação aos outros dois métodos alternativos. A lança não produz o mesmo nível de hidrogênio final que o rotor rotativo e lança porosa, sendo necessário tempos de desgasificação três vezes mais longos.

A temperatura também desempenha um papel importante na eficiência de desgasificação. A solubilidade do hidrogênio e a pressão parcial de hidrogênio diminui quando a temperatura é baixa. Portanto, a eficiência de desgasificação é melhorada a baixas temperaturas.

Assim, a eficiência de desgasificação é fortemente dependente do tamanho da bolha, que por sua vez depende da forma como as bolhas são produzidas no banho metálico. A eficiência pode também depender do tipo de gás utilizado [9].

2.7.3 PROCEDIMENTO DE DESGASIFICAÇÃO DA EMPRESA

O procedimento a seguir para um correcto funcionamento da desgasificação é o seguinte:

1. Acerto das pressões de insuflação:
 - 1.1. a garrafa de Azoto tem uma pressão superior aos 5 Bar.
 - 1.2. a pressão de saída do Azoto é de 5 bar.
2. Colocação vareta junto do fundo do forno, passando a vareta por toda a área do banho metálico assegurando uma boa desgasificação e homogeneização.

A temperatura de desgasificação situa-se entre os [640,760] °C, dado que abaixo do limite inferior do intervalo pode ocorrer o risco de solidificação do alumínio e acima

do limite máximo o processo de desgasificação perderá eficiência, uma vez que se verifica o aumento da quantidade de hidrogénio dissolvido no banho.

3. Retirada da vareta de desgasificação de dentro do forno, deixar aproximadamente 15 segundos o circuito de azoto em funcionamento a fim de retirar/limpar qualquer alumínio existente no interior da mesma.

4. Fecho lentamente as válvulas no bloco de azoto.



FIGURA 25 – Unidade de desgasificação.



FIGURA 26 – Processo de desgasificação utilizado na empresa.

Na Figura 25 é mostrado os diferentes componentes da unidade de desgasificação: 1 – válvula de abertura do gás inerte; 2 – vareta de desgasificação.

O controlo destes parâmetros é efectuado semanalmente e anotado numa folha de registos.

Decorrido o tempo de desgasificação o sistema é desligado. A escória que se acumulou na superfície do banho é retirada com o auxílio de uma escumadeira de aço.

Para se controlar a operação da desgasificação, é vazado o banho tratado pelo gás, para um molde de ferro fundido. Após a solidificação da amostra, esta é arrefecida em água e cortada a meio no sentido da altura. É desbastada, polida, lavada e seca para posterior observação.

2.8 DENSIDADE

A densidade absoluta é definida como a quantidade de massa numa unidade de volume:

$$d_{\text{amostra}} = \frac{m_{\text{amostra}}}{V_{\text{amostra}}} \quad (8)$$

A densidade absoluta é uma propriedade específica, isto é, cada substância pura tem uma densidade própria, que a identifica e a diferencia das outras substâncias.

Outra forma de calcular a densidade é pelo princípio de Arquimedes que pode ser enunciado da seguinte forma: “Um fluido em equilíbrio age sobre corpo sólido nele imerso (parcial ou totalmente) com uma força vertical orientada de baixo para cima, denominada impulso, aplicada no centro de gravidade do volume de fluido deslocado, cuja intensidade é igual a do peso do volume de fluido deslocado”.

A densidade relativa de um corpo sólido pode ser definida como a relação entre a massa do monólito e a massa de um volume igual de um líquido. A densidade relativa é característica para cada corpo sólido, e depende basicamente de dois factores: da composição química e a forma como estes elementos estão arrançados dentro da estrutura cristalina.

$$d_{\text{amostra}} = \frac{m_{\text{amostra}}}{m_{\text{amostra}} - m_{\text{aparente}}} \quad (9)$$

2.9 ESTIMA DO TEOR DE HIDROGÉNIO – STRAUBE-PHEIFFER

O teste Straube-Pheiffer, ou ensaio de pressão reduzida, é utilizado comumente para avaliar o teor de hidrogénio dissolvido nos banhos de alumínio. Uma amostra de alumínio fundido é colocado num cadinho, o ar contido na campânula é evacuado para um determinado valor de pressão até o metal solidificar. Os equipamentos necessários para este teste são muito simples, é constituído por uma bomba de vácuo conectado a uma redoma robusta com uma tampa amovível e equipado com um selo de vácuo. As amostras são retiradas em cadinhos de aço, ferro fundido ou de cerâmica, normalmente com cerca de 100 g de capacidade.

Dependendo da informação desejada, a amostra pode ser avaliada por uma destas formas [9]:

1. A observação da evolução da bolha durante a solidificação. Isso é indicativo de um alto teor de gás.
2. A observação da superfície da amostra solidificada. A superfície convexa indica um alto grau de porosidade interna causada por nucleação de gás. Por outro lado, uma superfície côncava, devido ao rechupe indica uma baixa concentração de gás.
3. Seccionamento da amostra e polimento em bruto de uma face de corte, permitindo uma avaliação qualitativa visual do grau de porosidade interna. A amostra é posteriormente comparada com uma série de imagens padrão normalizadas. Esses padrões podem ser relacionados com valores de hidrogénio determinados analiticamente.

4. A medição da densidade da amostra e, após a correcção adequada, para calcular a concentração de hidrogénio no banho metálico.

Os efeitos que são observados na amostra solidificada são muito sensíveis à pressão, assim é essencial que os resultados obtidos sejam comparados com amostras em condições idênticas. É importante especificar a pressão reduzida utilizada para que os ensaios possam ser repetidos em condições válidas.

A razão para a realização do teste sob pressão reduzida é simplesmente por conveniência da ampliação do volume de gás natural por um factor de dez (ou mais se realizado a pressão mais baixa, um factor de 30 raramente é ultrapassado). Portanto, expandem-se por causa da pressão reduzida e formam poros maiores do que se a amostra fosse solidificada sob pressão atmosférica [8].

O teste de Straube-Pheiffer também é usado para determinar a densidade da amostra, sob condições específicas e correlacionar os resultados com a densidade teórica da liga. O teor de hidrogénio pode então ser estimado pela diferença de densidades, com uma correcção para as condições de temperatura e pressão. O cálculo é o seguinte [6]:

$$D = \frac{\text{Peso do metal} + \text{Peso do gás}}{\text{Volume do metal} + \text{Volume de gás}} \quad (10)$$

O peso do gás pode ser negligenciado. Assim:

$$\frac{1}{D} = \frac{\text{Volume do metal} + \text{volume de gás}}{\text{Peso de metal}} \quad (11)$$

O primeiro termo do lado direito da equação 11 é simplesmente a densidade teórica da liga em questão (D_0). A estima do volume de gás (V_m) é, portanto, dada por:

$$V_m = \left(\frac{1}{D_{\text{amostra}}} - \frac{1}{D_0} \right) \times 100 \quad (12)$$

onde V_m é expresso em mililitros por 100 gramas de metal.

O volume de gás medido (V_m) deve ser corrigido para o volume de gás em condições PTN usando a lei de Boyle e de Charles:

$$k = \left(\frac{\text{Pressão teste}}{760} \right) \times \left(\frac{273}{273 + \text{Temperatura solidificação}} \right) \quad (13)$$

onde a pressão do teste é expressa em milímetros de mercúrio (mmHg) e temperatura de solidificação da liga em graus Celsius. Assim:

$$V_{\text{gás}} = k \times \left(\frac{1}{D_{\text{amostra}}} - \frac{1}{D_0} \right) \times 100 \quad (14)$$

onde k é uma constante calculada na equação [13], $V_{\text{gás}}$ é expresso em mililitros por 100 gramas de metal e o D_0 é em g/cm^3 .

Para cada liga, existe um conjunto de condições de teste. Para uma dada liga é possível desenvolver uma relação entre a densidade e o teor de hidrogénio real. A densidade relativa das amostras pode ser medida pelo princípio de Arquimedes.

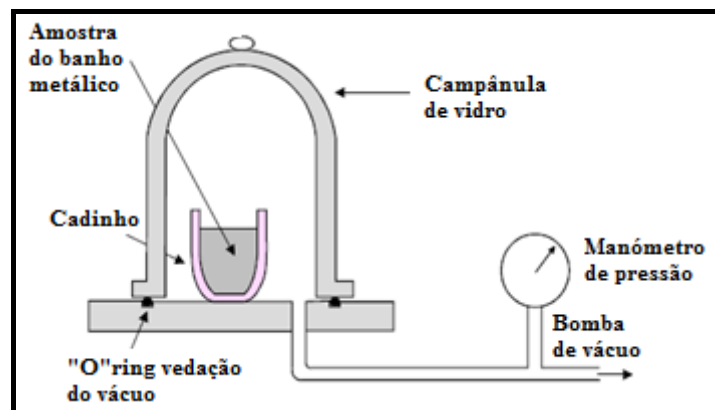


FIGURA 27 – Esquema do aparelho de vácuo [11].

Cuidados que devem ser tomados para manter as condições de ensaio [8]:

- Pressão - a pressão aplicada à amostra neste teste tem um grande impacto na formação de bolhas de gás. O vácuo deve ser feito no menor tempo possível e ser constante a partir do momento que se coloca a amostra.
- Taxa de arrefecimento - a taxa de solidificação é importante em termos da distribuição de hidrogénio e das temperaturas *liquidus* e *solidus*. O arrefecimento lento pode causar desgasificação e levar a resultados falsos.
- Inclusões - o número e tamanho dos poros de hidrogénio dependem da presença de micro-inclusões não metálicas. Inclusões na amostra podem alterar os parâmetros do teste. Sem micro-inclusões finamente dispersa para iniciar a formação de bolhas, concentrações relativamente altas de hidrogénio são necessárias para superar a tensão de superfície do banho metálico. Isso pode levar a resultados enganadores quando o metal usado foi filtrado.

3 TÉCNICA EXPERIMENTAL

As amostras foram retiradas de um banho metálico de alumínio com cerca de 10 toneladas. Para garantir que as amostras retiradas eram semelhante ao longo de todo o banho metálico, para o mesmo tempo de desgasificação e temperatura, foram retiradas amostras de diferentes locais do forno (Figura 28). As amostras foram codificadas com V (boca de vazamento), F (frente do forno) e T (traseiras do forno).

Para avaliar o teor de hidrogénio dissolvido foram efectuados ensaios em 10 fusões diferentes, sendo retirados 6 amostras em cada uma delas.

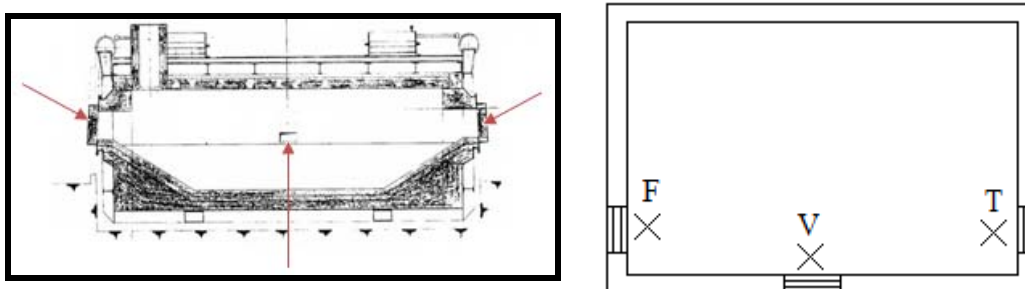


FIGURA 28 – Zonas onde foram retiradas as amostras.

3.1 EQUIPAMENTO UTILIZADO

Para a realização dos ensaios de Straube-Pheiffer apresentados ao longo deste trabalho, foi utilizado um aparelho de solidificação em vácuo (Figura 29). A recolha das amostras do banho metálico foi efectuada com um cadinho com 40 cm³ de volume, correspondendo a uma massa de 100g de alumínio (Figura 30).



FIGURA 29 – Aparelho de solidificação em vácuo.



FIGURA 30 – Cadinhos usados.

Para a determinação da massa aparente das amostras recorreu-se ao esquema mostrado na Figura 31.

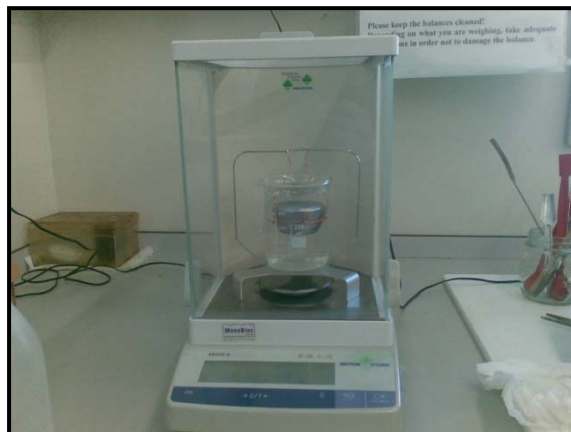


Figura 31 – Esquema para determinar massa aparente.

Utilizou-se o programa PAQI para uma análise quantitativa das partículas contidas nas amostras, bem como para a aquisição de imagens das amostras.

3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

De forma a realizar a avaliação foi desenvolvido um procedimento experimental, tendo por base o teste de Straube-Pheiffer. A partir do fluxograma abaixo é possível visualizar as principais etapas do procedimento.



FIGURA 32 – Fluxograma do procedimento experimental.

Mais detalhadamente, o procedimento adoptado é apresentado a seguir:

1. Verificação da temperatura do forno de afinação

– É definido pela empresa que a temperatura de desgasificação deverá estar entre os 640 e 760°C. Assim quando a temperatura do forno estiver dentro dos parâmetros delimitados são retiradas as amostras.

2. Recolha da amostra sem desgasificar

– Para se conseguir avaliar o estado inicial do banho foi retirada uma amostra sem desgasificar. Esta serve como um ponto de referência no desenvolvimento do trabalho.

3. Arrefecimento em vácuo.

– Seguidamente à recolha da amostra, esta é colocada no aparelho de vácuo e fez-se vácuo. O tempo de arrefecimento foi de 12 minutos.

4. Pesagem da amostra

– Todas as amostras foram pesadas, para que fosse possível determinar a densidade das mesmas.

5. Colocação num goblé graduado com água

– Cada amostra foi colocada numa proveta graduado com água onde foi determinado o valor do volume.

6. Medição da diferença de volume.

– A determinação do volume é subjacente à diferença entre o volume final e o inicial de água na proveta de ensaio.

7. Determinação da densidade da amostra

– Para determinar a densidade da amostra foram utilizadas duas técnicas:

1) Densidade absoluta

–As amostras foram pesadas, com uma precisão decimal, e o peso registado. Numa proveta graduada foi medido o volume das amostras. O cálculo da densidade das amostras é efectuado de acordo com a fórmula abaixo.

$$D_{\text{amostra}} = \frac{m_{\text{amostra}}}{V_{\text{amostra}}}$$

D_{amostra} – Densidade da amostra

m_{amostra} – massa da amostra, g

V_{amostra} – volume da amostra, cm^3

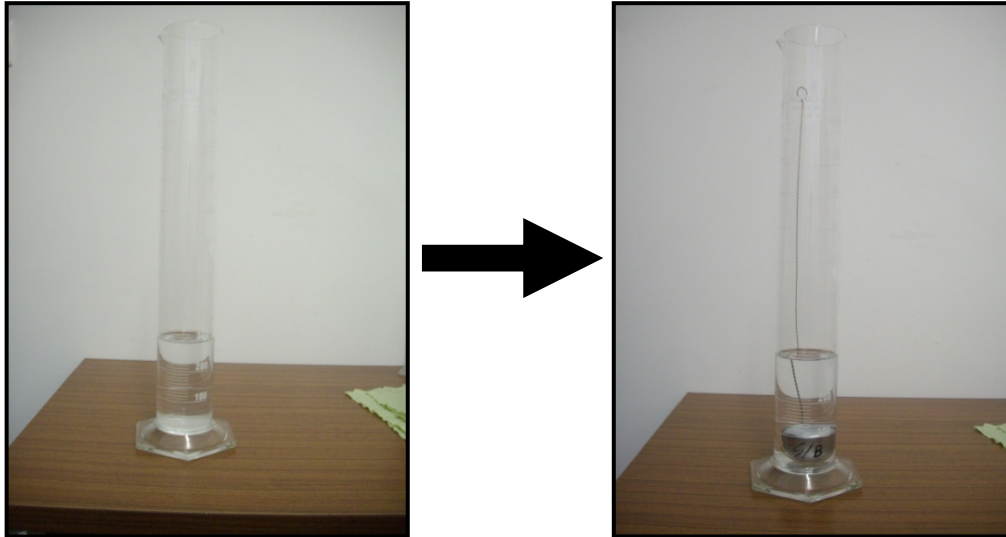


FIGURA 33 – Procedimento para determinar o volume da amostra.

Por exemplo:

D_{amostra} – Densidade da amostra

m_{amostra} – 99,60 g

V_{amostra} – 39 cm³

$$D_{\text{amostra}} = \frac{99,60}{39} = 2,56 \text{ g/cm}^3$$

2) Princípio de Arquimedes.

– As amostras foram pesadas, numa balança analítica. Posteriormente foram pesadas imersas num goblé com água, determinando assim a massa aparente das amostras. Pela fórmula abaixo, foi calculada a densidade da amostra.

$$D_{\text{amostra}} = \frac{m_{\text{amostra}}}{m_{\text{amostra}} - m_{\text{aparente}}}$$

D_{amostra} – Densidade da amostra

m_{amostra} – massa da amostra, g

m_{aparente} – massa aparente da amostra, g



FIGURA 34 – Ensaio para determinar a massa aparente da amostra.

Assim para a mesma amostra,

D_{amostra} – Densidade da amostra

m_{amostra} – 99,87 g

m_{aparente} – 61,02 g

$$D_{\text{amostra}} = \frac{99,87}{99,87 - 61,02} = 2,60 \text{ g/cm}^3$$

8. Cálculo do volume de gás

– Através da fórmula apresentada e já explicitada anteriormente foi avaliado o volume de gás por 100g de alumínio:

$$V_{\text{gás}} = k \times \left(\frac{1}{D_{\text{amostra}}} - \frac{1}{D_0} \right) \times 100$$

D_0 – Densidade teórica da liga

D_{amostra} – Densidade da amostra

k – correcção do volume para condições standard (Lei de Boyle e Charles)

Em que:

$$k = \left(\frac{\text{Pressão teste}}{760} \right) \times \left(\frac{273}{273 + \text{temperatura de solidificação da liga}} \right)$$

Para o valor de densidade calculado anteriormente foi estimado o volume de gás das amostras:

$$k = \left(\frac{550}{760} \right) \times \left(\frac{273}{273 + 610} \right) = 0,23$$

$$\begin{array}{l} D_0 - 2,76 \text{ g/cm}^3 \\ D_{\text{amostra}} - 2,56 \text{ g/cm}^3 \\ k - 0,30 \end{array} \quad V_{\text{gás}} = 0,23 \times \left(\frac{1}{2,56} - \frac{1}{2,76} \right) \times 100$$
$$V_{\text{gás}} = 0,65 \text{ ml/100g Al}$$

9. Recolha das amostras

- Para a determinação da densidade em diferentes tempos foram recolhidas amostras com tempos de desgasificação de 2, 4, 6, 8, 10 minutos.

10. Repetição dos passos 2 até ao 6.

Para avaliar qualitativamente o teor de gases das amostras foram feitas dois tipos de análise: pelo aspecto da superfície da amostra, e pela presença de porosidade no interior da mesma (após corte). Assim, foi necessário recorrer ao corte das amostras e posterior preparação para observação metalográfica. Esta preparação consistiu no desbaste das amostras com lixas de 180, 320, 400 e 600 mesh e posterior acabamento com panos de 6 e 1 μ m.

Para determinar a percentagem de poros contidos nas amostras recorreu-se ao programa de análise quantitativa de imagem PAQI. Este programa faz uma análise das porosidades em cada campo observado ao microscópio. O princípio de funcionamento é pela diferença de contraste da imagem, sendo assim possível delimitar o perímetro dos poros e posteriormente a respectiva área. Foram analisados 25 campos de cada amostra de uma forma aleatória.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo é feita a apresentação e discussão dos resultados obtidos. Previamente foi feito um levantamento das matérias-primas utilizadas em cada fusão e analisada a sua influência no teor de hidrogénio. Seguidamente foi calculado o valor da densidade de todas as amostras retiradas na boca de vazamento, pelos dois métodos (relativa e absoluta). No seguimento e com a ajuda do programa PAQI foi possível determinar a percentagem de poros por unidade de área do campo analisado. Por fim foram observadas e registadas as microestruturas ao longo dos tempos de desgasificação.

4.1 ANÁLISE DA SUCATA

A absorção de hidrogénio pelo alumínio está fortemente dependente do tipo de sucatas que são utilizadas. Por isso, existe a necessidade de classificar as sucatas de alumínio. Em cada fusão são usados diferentes tipos de sucatas para se obter uma dada liga. A contaminação das sucatas é um factor relevante na fusão contribuindo para a qualidade do banho, bem como para a absorção de hidrogénio. Nas Tabela 9 e

TABELA 10 são apresentadas as matérias-primas e as quantidades que foram empregues em cada uma das fusões.

TABELA 9 – Matérias-primas usadas.

Matéria-prima	C36.10		C39.10		C42.10		C46.10		C49.10	
	Qtd. (Kg)	%	Qtd. (Kg)	%	Qtd. (Kg)	%	Qtd. (Kg)	%	Qtd. (Kg)	%
Jorra	400	3	444	4	503	4	472	4	300	2
A1.1										
A1.2										
A2.2							274	2		
B1.1	4314	37	4668	38	4442	32	6681	59	4164	34
B3.2										
A4.0	345	3	126	1	258	2	520	5	500	4
E			357	3	587	4	512	4	524	4
D6	199	2	129	1	149	1	2159	19	207	2
C	5660	49	5809	48	7409	54			4156	34
Jantes									1728	14
Si	450	4	500	4	350	3	610	5	450	4
Cu	210	2	180	1	130	1	181	2	193	2
Total	11578		12213		13828		11409		12222	

Nas fusões analisadas observa-se uma grande percentagem de B1.1 (vasilhame) e C (peças fundidas), que são matérias-primas bastante contaminadas com tintas, revestimentos, terra e lubrificantes. Quando se funde este tipo de sucatas o fundente utilizado para proteger o banho não consegue desempenhar a sua função com eficácia. Assim o banho metálico está mais tempo em contacto com os gases de combustão e as reacções de absorção de hidrogénio ocorrem com mais facilidade devido a alta reactividade do alumínio. Comparando estas fusões com os valores de densidade apresentados no próximo capítulo é possível constatar que a percentagem de B1.1 utilizada, reduz a densidade do alumínio fundido para 2,57 g/cm³.

TABELA 10 – Matérias-primas usadas (continuação).

Matéria-prima	C52.10		C59.10		C62.10		C67.10		C70.10	
	Qtd. (Kg)	%	Qtd. (Kg)	%	Qtd. (Kg)	%	Qtd. (Kg)	%	Qtd. (Kg)	%
Jorra	2380	19					673	6	1425	12
A1.1					6175	59	1865	16	2197	18
A1.2							986	8	0	
A2.2	629	5							305	2
B1.1	6356	52	4258	35	300	3	1554	13	661	5
B3.2			558	5	219	2	292	2	367	3
A4.0	636	5								
E	995	8	2280	19	2687	26			1257	10
D6	434	4	308	3	427	4	478	4	368	3
C			3760	31			5201	44	5155	42
Jantes			352	3						
Si	705	6	500	4	500	5	515	4	450	4
Cu	180	1	220	2	190	2	192	2	140	1
Total	12315		12236		10498		11756		12325	

Observa-se na

TABELA 10 que houve um aumento da utilização de E (limalhas e briquetes) que também provoca um estrago da camada protectora do alumínio (fundente), indiciando um maior contacto do banho metálico de alumínio com a atmosfera do forno. Este contacto é bastante nocivo ao banho, pois permite uma absorção de hidrogénio contido na atmosfera do forno.

4.2 CÁLCULO DA DENSIDADE

As densidades das amostras foram calculadas segundo duas fórmulas: densidade absoluta e pelo princípio de Arquimedes conforme as equações [8] e [9] da página 27 e 28, respectivamente e conforme a tabela 11.

1. Densidade absoluta

TABELA 11 – Cálculo das densidades das amostras.

Fusão	Amostra	Massa da amostra (g)	Volume (cm ³)	Densidade da amostra (g/cm ³)	Temperatura de desgasificação (°C)
C36.10	0	99,70	39,00	2,56	665
	2	89,60	34,50	2,60	
	4	104,80	39,50	2,65	
	6	101,00	37,50	2,69	
	8	108,50	40,00	2,71	
	10	105,90	39,00	2,72	
C39.10	0	99,00	38,50	2,57	680
	2	89,70	34,50	2,60	
	4	106,50	40,00	2,66	
	6	99,90	37,00	2,70	
	8	108,60	40,00	2,72	
	10	85,80	31,50	2,72	
C42.10	0	87,50	34,00	2,57	665
	2	90,20	34,50	2,61	
	4	87,90	33,00	2,66	
	6	93,90	35,00	2,68	
	8	95,60	35,40	2,70	
	10	82,80	30,50	2,71	
C46.10	0	106,80	41,50	2,57	665
	2	102,90	39,50	2,61	
	4	97,60	36,50	2,67	
	6	89,00	33,00	2,70	
	8	88,50	32,50	2,72	
	10	89,60	33,00	2,72	
C49.10	0	85,90	33,50	2,56	690
	2	90,40	34,50	2,62	
	4	98,90	37,00	2,67	
	6	84,60	31,50	2,69	

	8	82,80	30,50	2,71
	10	90,80	33,50	2,71

TABELA 12 – Cálculo das densidades das amostras (continuação).

Fusão	Amostra	Massa da amostra (g)	Volume (cm ³)	Densidade da amostra (g/cm ³)	Temperatura de desgasificação (°C)
C52.10	0	90,40	35,00	2,58	700
	2	75,90	29,00	2,62	
	4	59,70	22,50	2,65	
	6	116,70	43,50	2,68	
	8	78,70	29,00	2,71	
	10	115,60	42,50	2,72	
C59.10	0	78,80	30,50	2,58	700
	2	87,70	33,50	2,62	
	4	66,50	25,00	2,66	
	6	77,90	29,00	2,69	
	8	118,60	44,00	2,70	
	10	60,95	22,50	2,71	
C62.10	0	72,30	28,00	2,58	720
	2	77,10	29,50	2,61	
	4	79,90	30,00	2,66	
	6	68,90	25,50	2,70	
	8	70,40	26,00	2,71	
	10	80,30	29,50	2,72	
C67.10	0	79,90	31,00	2,58	710
	2	100,10	38,50	2,60	
	4	87,30	33,00	2,65	
	6	81,90	30,50	2,69	
	8	84,00	31,00	2,71	
	10	68,10	25,00	2,72	
C70.10	0	90,40	35,00	2,58	720
	2	75,90	29,00	2,62	
	4	59,70	22,50	2,65	
	6	116,70	43,50	2,68	
	8	78,70	29,00	2,71	
	10	115,60	42,50	2,72	

Pela análise das tabelas é possível aferir que à medida que o tempo de desgasificação aumenta a densidade também aumenta. Este comportamento era o esperado visto que ao desgasificar estamos a libertar gases do interior do banho.

Na Tabela 13 apresenta-se as médias em função do tempo de desgasificação, e também é aferida a redução entre os tempos de desgasificação. Observa-se que a redução a partir dos 9 minutos é bastante inferior às verificadas entre os outros tempos.

Através dos valores médios apresentados é possível ver que a partir dos 9 minutos a redução do teor de gases é mínima, indiciando assim uma tendência linear nos $2,7 \text{ g/cm}^3$, não fazendo prever um aumento significativo da densidade.

Podendo assim dizer que não se obtêm um ganho significativo na densidade da amostra com o tempo de desgasificação de 10 minutos. Justificando assim um tempo de desgasificação de 9 minutos como o tecnicamente ideal para o banho metálico de 10 toneladas.

TABELA 13 – Valores médios da densidade das amostras.

Médias Densidade (g/cm^3)					
S/	2	4	6	8	10
2,57	2,61	2,66	2,69	2,71	2,72
Redução	0,04	0,05	0,03	0,02	0,01

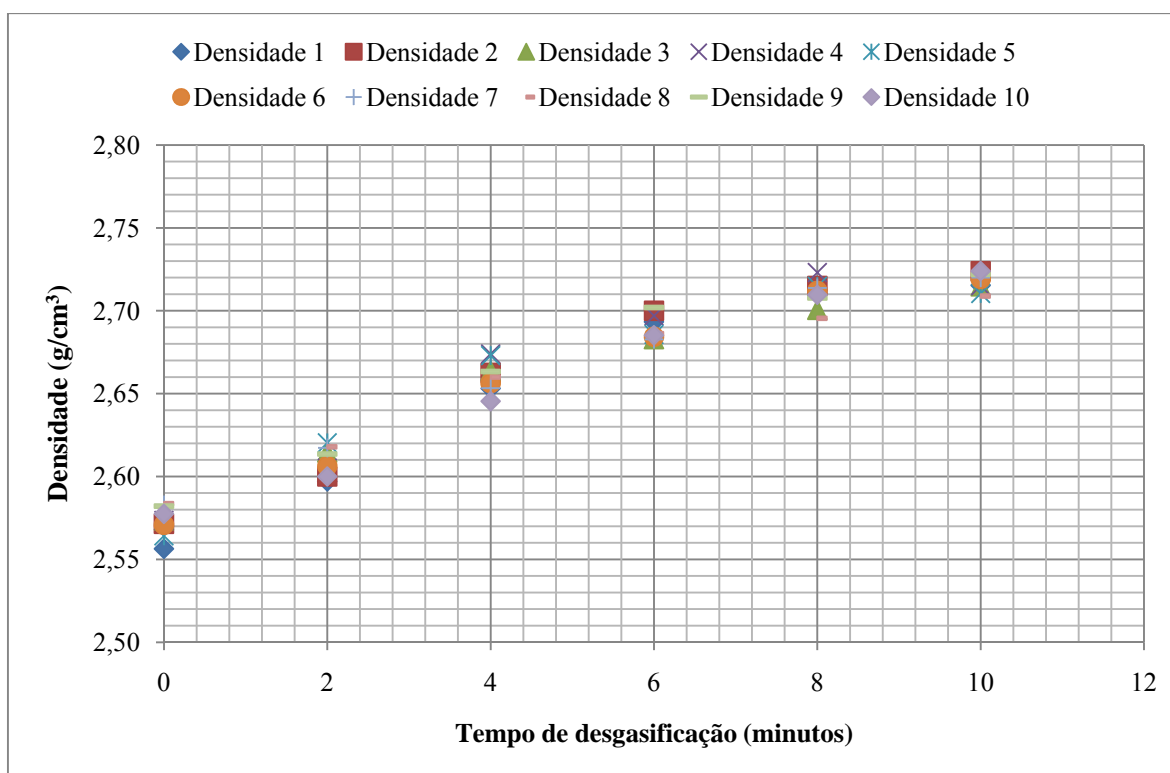


FIGURA 35 – Gráfico densidade em função do tempo de desgasificação

Como se verifica pela observação do gráfico da Figura 35 a partir dos 9 minutos de desgasificação apenas se observa um curto aumento da densidade das amostras. Assim

considera-se que o tempo de desgasificação adequado para um banho metálico de 10 toneladas é de 9 minutos. Pelo gráfico nota-se que a partir dos 9 minutos o valor da densidade não sofrerá alterações significativas. Os módicos aumentos de densidade obtidos a partir dos 9 minutos não são considerados por não existir um ganho efectivo na densidade com o acréscimo de tempo de desgasificação.

Sendo considerado uma densidade teórica da liga de $2,76 \text{ g/cm}^3$, pôs-se como limite inferior o valor de $2,70 \text{ g/cm}^3$. Sendo este valor de densidade mínimo aceitável no final do processo de desgasificação.

Como este processo de desgasificação tem um custo associado do gás inerte usado (azoto) e o tempo gasto pelo operador, houve a necessidade de adequar o tempo de desgasificação para um mínimo aceitável. Contudo há também que garantir a qualidade do banho metálico e que este esteja isento ou parcialmente isento de gases dissolvidos. Com todas estas premissas impostas foi estimado o tempo ideal de desgasificação que se referiu para o banho metálico de 10 toneladas.

2. Princípio de Arquimedes**TABELA 14** – Cálculo da densidade pelo princípio de Arquimedes.

Cálculo da densidade					
Fusão	Amostra	Massa da amostra (g)	Massa aparente (g)	Densidade da amostra (g/cm³)	Temperatura de desgasificação (°C)
C36.10	0	99,87	61,52	2,60	665
	2	89,68	55,45	2,62	
	4	104,99	65,21	2,64	
	6	100,37	63,12	2,69	
	8	108,59	68,44	2,70	
	10	85,92	54,35	2,72	
C39.10	0	95,02	58,36	2,59	680
	2	97,34	60,74	2,66	
	4	96,37	60,30	2,67	
	6	109,35	68,77	2,69	
	8	88,07	55,40	2,70	
	10	81,16	51,20	2,71	
C42.10	0	87,60	54,13	2,62	665
	2	90,90	56,30	2,63	
	4	87,99	54,75	2,65	
	6	93,81	58,79	2,68	
	8	95,18	59,89	2,70	
	10	82,86	52,52	2,73	
C46.10	0	106,88	65,69	2,59	665
	2	102,97	63,51	2,61	
	4	97,88	60,80	2,64	
	6	89,07	55,57	2,66	
	8	88,55	55,50	2,68	
	10	89,62	56,55	2,71	
C49.10	0	86,08	52,88	2,59	690
	2	90,85	56,12	2,62	
	4	99,13	61,40	2,63	
	6	85,06	53,12	2,66	
	8	83,08	52,00	2,67	
	10	90,79	57,30	2,71	

TABELA 15 – Cálculo da densidade pelo princípio de Arquimedes (continuação).

Cálculo da densidade					
Fusão	Amostra	Massa da amostra (g)	Massa aparente (g)	Densidade da amostra (g/cm ³)	Temperatura de desgasificação (°C)
C52.10	0	70,78	43,22	2,57	700
	2	83,78	51,57	2,60	
	4	73,07	45,27	2,63	
	6	85,86	53,43	2,65	
	8	68,39	42,75	2,67	
	10	62,97	39,84	2,72	
C59.10	0	90,73	55,49	2,57	700
	2	75,93	46,59	2,59	
	4	59,63	36,78	2,61	
	6	116,25	72,68	2,67	
	8	78,62	49,26	2,68	
	10	115,65	73,50	2,74	
C62.10	0	78,28	47,95	2,58	720
	2	87,26	53,81	2,61	
	4	66,85	41,46	2,63	
	6	77,18	48,05	2,65	
	8	117,50	73,53	2,67	
	10	60,48	38,25	2,72	
C67.10	0	74,12	45,20	2,56	710
	2	77,04	47,26	2,59	
	4	79,92	49,33	2,61	
	6	68,91	42,79	2,64	
	8	70,54	44,25	2,68	
	10	80,53	50,83	2,71	
C70.10	0	80,06	48,84	2,56	720
	2	100,19	61,45	2,59	
	4	76,91	47,57	2,62	
	6	71,73	44,53	2,64	
	8	84,10	52,77	2,68	
	10	68,83	43,35	2,70	

Por este método também foi possível aferir o tempo de desgasificação tecnicamente aceitável. O único problema que possui este método é o facto de não ser exequível na empresa por falta de elementos para o ensaio, tais como balança analítica e material específico para o princípio de Arquimedes.

Os valores obtidos são em tudo semelhantes aos calculados pelo método de densidade absoluta.

TABELA 16 – Médias das densidades calculadas pelo princípio de Arquimedes.

Médias Densidade (Arquimedes) (g/cm ³)						
S/	2	4	6	8	10	
2,58	2,61	2,65	2,69	2,70	2,71	
Redução	0,03	0,05	0,03	0,02	0,01	

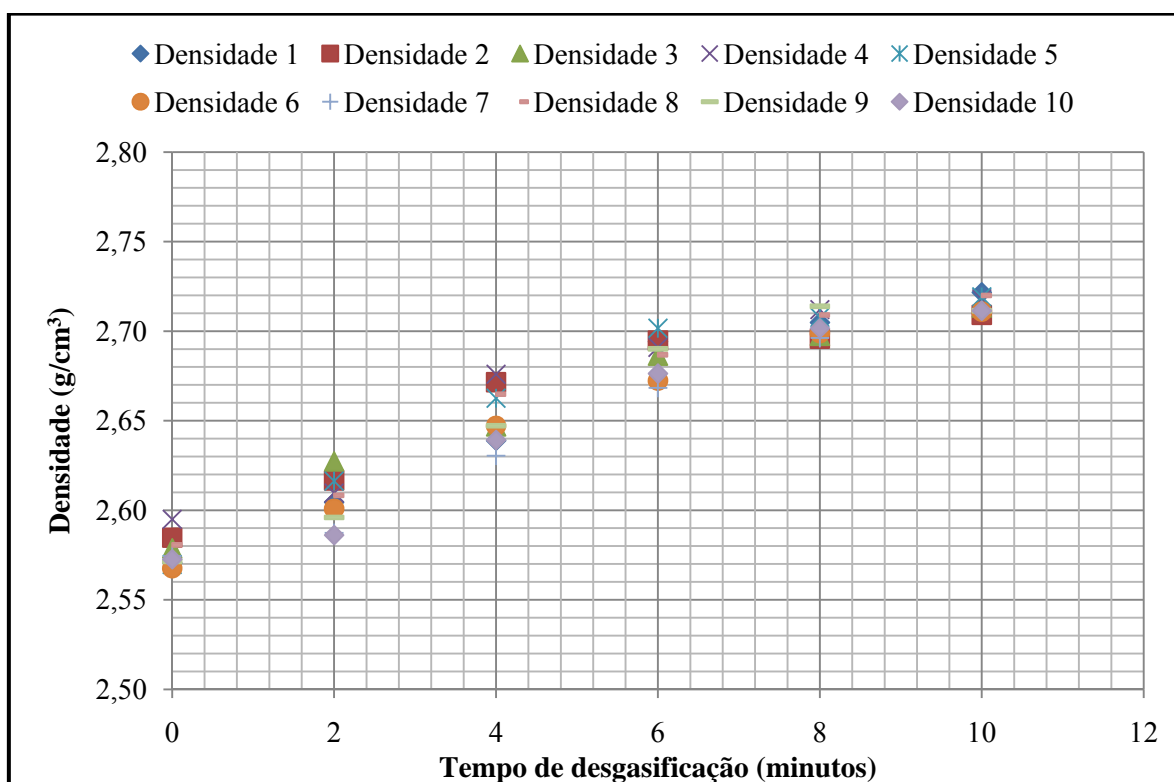


FIGURA 36 – Gráfico densidade (princípio de Arquimedes) em função do tempo de desgasificação

É passível de se comprovar pela Tabela 17 que os valores não sofrem grande alteração entre os dois métodos de determinação da densidade das amostras.

Verifica-se também que os valores de densidade variam entre os 2,56 e 2,72 g/cm³.

TABELA 17 – Valores máximos e mínimos da densidade nos dois métodos.

Densidade (g/cm ³)		
	Máximos	Mínimos
1	2,72	2,56
2	2,72	2,57

4.3 ENSAIOS DE STRAUBE-PHEIFFER

Recorrendo ao ensaio a pressão reduzida ou de Straube-Pheiffer foi possível estimar o teor de gases dissolvidos nas amostras recolhidas. Pelas fórmulas (13) e (14) foi estimado o volume de gás dissolvido.

Todos os valores necessários para o cálculo do volume de gás foram retirados aquando da execução experimental, em cada fusão.

A pressão de teste foi lida no manómetro do aparelho de vácuo. Para determinar a temperatura de solidificação recorreu-se ao diagrama de fase alumínio-silício-cobre. A partir do diagrama retirou-se uma temperatura de solidificação de 600°C.

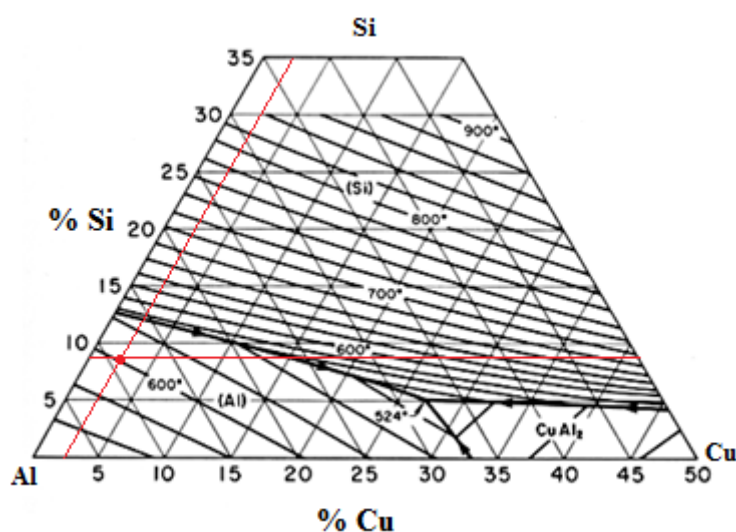


FIGURA 37 – Diagrama de fase Al-Si-Cu.

Os cálculos do ensaio de Straube-Pheiffer foram efectuados recorrendo aos valores de densidade obtidos pelos dois métodos anteriores.

Nas Tabela 18 e Tabela 19 são mostrados todos os valores auxiliares do cálculo do volume de gás segundo valores de densidade determinada pela densidade absoluta da amostra.

Nas Tabela 21 e TABELA 22 são apresentados os valores obtidos utilizando a densidade calculada pelo princípio de Arquimedes.

1. Densidade absoluta

TABELA 18 – Cálculo do volume de gás das amostras.

Fusão	Amostra	Cálculo do K			Cálculo Volume de gás		
		Pressão de ensaio (mmHg)	Temperatura solidificação (°C)	k	Densidade absoluta da amostra (g/cm ³)	Densidade teórica (g/cm ³)	Volume de gás (ml/100g)
C36.10	0	550	600,00	0,23	2,56	2,76	0,65
	2	550	600,00	0,23	2,60	2,76	0,51
	4	550	600,00	0,23	2,65	2,76	0,33
	6	550	600,00	0,23	2,69	2,76	0,20
	8	550	600,00	0,23	2,71	2,76	0,14
	10	550	600,00	0,23	2,68	2,76	0,13
C39.10	0	550	600,00	0,23	2,57	2,76	0,60
	2	550	600,00	0,23	2,60	2,76	0,50
	4	550	600,00	0,23	2,63	2,76	0,30
	6	550	600,00	0,23	2,71	2,76	0,18
	8	550	600,00	0,23	2,72	2,76	0,14
	10	550	600,00	0,23	2,72	2,76	0,11
C42.10	0	550	600,00	0,23	2,57	2,76	0,59
	2	550	600,00	0,23	2,61	2,76	0,46
	4	550	600,00	0,23	2,66	2,76	0,30
	6	550	600,00	0,23	2,68	2,76	0,24
	8	550	600,00	0,23	2,69	2,76	0,18
	10	550	600,00	0,23	2,71	2,76	0,14
C46.10	0	550	600,00	0,23	2,57	2,76	0,59
	2	550	600,00	0,23	2,61	2,76	0,49
	4	550	600,00	0,23	2,67	2,76	0,26
	6	550	600,00	0,23	2,70	2,76	0,19
	8	550	600,00	0,23	2,72	2,76	0,11
	10	550	600,00	0,23	2,72	2,76	0,14
C49.10	0	550	600,00	0,23	2,56	2,76	0,63
	2	550	600,00	0,23	2,62	2,76	0,44

	4	550	600,00	0,23	2,67	2,76	0,27
	6	550	600,00	0,23	2,69	2,76	0,23
	8	550	600,00	0,23	2,71	2,76	0,14
	10	550	600,00	0,23	2,71	2,76	0,15

TABELA 19 – Cálculo do volume de gás das amostras (continuação).

Fusão	Amostra	Cálculo do K			Cálculo Volume de gás		
		Pressão de ensaio (mmHg)	Temperatura solidificação (°C)	k	Densidade absoluta da amostra (g/cm ³)	Densidade teórica (g/cm ³)	Volume de gás (ml/100g)
C52.10	0	550	600,00	0,23	2,57	2,76	0,60
	2	550	600,00	0,23	2,61	2,76	0,48
	4	550	600,00	0,23	2,66	2,76	0,32
	6	550	600,00	0,23	2,68	2,76	0,23
	8	550	600,00	0,23	2,71	2,76	0,15
	10	550	600,00	0,23	2,72	2,76	0,12
C59.10	0	550	600,00	0,23	2,58	2,76	0,56
	2	550	600,00	0,23	2,62	2,76	0,45
	4	550	600,00	0,23	2,65	2,76	0,33
	6	550	600,00	0,23	2,68	2,76	0,24
	8	550	600,00	0,23	2,71	2,76	0,14
	10	550	600,00	0,23	2,72	2,76	0,12
C62.10	0	550	600,00	0,23	2,58	2,76	0,56
	2	550	600,00	0,23	2,62	2,76	0,45
	4	550	600,00	0,23	2,66	2,76	0,31
	6	550	600,00	0,23	2,69	2,76	0,23
	8	550	600,00	0,23	2,70	2,76	0,20
	10	550	600,00	0,23	2,71	2,76	0,15
C67.10	0	550	600,00	0,23	2,58	2,76	0,56
	2	550	600,00	0,23	2,61	2,76	0,46
	4	550	600,00	0,23	2,66	2,76	0,30
	6	550	600,00	0,23	2,70	2,76	0,18
	8	550	600,00	0,23	2,71	2,76	0,16
	10	550	600,00	0,23	2,72	2,76	0,11
C70.10	0	550	600,00	0,23	2,58	2,76	0,58
	2	550	600,00	0,23	2,60	2,76	0,50
	4	550	600,00	0,23	2,65	2,76	0,36

	6	550	600,00	0,23	2,69	2,76	0,23
	8	550	600,00	0,23	2,71	2,76	0,15
	10	550	600,00	0,23	2,72	2,76	0,11

Os valores médios do volume de gás indicam uma redução considerável entre sem desgasificar e os 4 minutos de desgasificação. A partir dos 6 minutos continua a diminuir o volume de gás mas não significativamente como anteriormente. Pode-se dizer que a redução entre os 8 e 10 minutos é diminuta, querendo dizer que o aumento do tempo de desgasificação não induz reduções de gases expressivas no banho a partir dos 8 minutos.

TABELA 20 – Valores médios do volume de gás das amostras.

Médias Volume de gás						
S/	2	4	6	8	10	
0,59	0,47	0,31	0,21	0,15	0,13	
Redução	0,12	0,17	0,09	0,06	0,02	

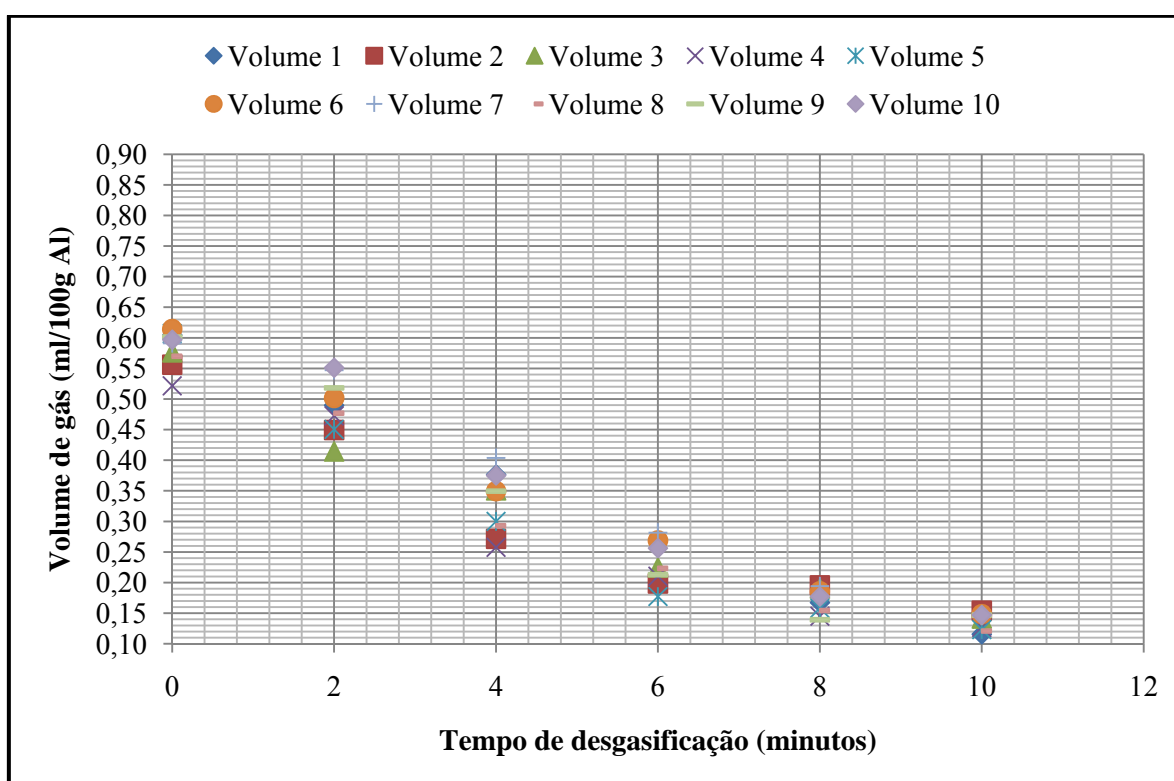


FIGURA 38 – Gráfico volume de gás em função do tempo de desgasificação.

O volume de gás inicialmente contido nas amostras é bastante elevado na ordem dos 0,59ml/100 g de metal. À medida que é feita a desgasificação este valor tende a baixar chegando a um ponto onde não se observa nenhuma melhoria. Podendo dizer-se que a partir dos 9 minutos não se justifica continuar a desgasificar o banho, pois não é obtido nenhum ganho significativo a partir desse tempo.

2. Princípio de Arquimedes

TABELA 21 – Cálculo do volume de gás das amostras (princípio de Arquimedes).

Fusão	Amostra	Cálculo do k			Cálculo Volume de gás		
		Pressão de ensaio (mmHg)	Temperatura solidificação (°C)	k	Densidade aparente da amostra (g/cm ³)	Densidade teórica (g/cm ³)	Volume de gás (ml/100g)
C36.10	0	550	600,00	0,23	2,57	2,76	0,65
	2	550	600,00	0,23	2,60	2,76	0,51
	4	550	600,00	0,23	2,64	2,76	0,33
	6	550	600,00	0,23	2,69	2,76	0,20
	8	550	600,00	0,23	2,70	2,76	0,14
	10	550	600,00	0,23	2,72	2,76	0,13
C39.10	0	550	600,00	0,23	2,58	2,76	0,60
	2	550	600,00	0,23	2,62	2,76	0,50
	4	550	600,00	0,23	2,67	2,76	0,30
	6	550	600,00	0,23	2,69	2,76	0,18
	8	550	600,00	0,23	2,70	2,76	0,14
	10	550	600,00	0,23	2,71	2,76	0,11
C42.10	0	550	600,00	0,23	2,58	2,76	0,59
	2	550	600,00	0,23	2,63	2,76	0,46
	4	550	600,00	0,23	2,65	2,76	0,30
	6	550	600,00	0,23	2,69	2,76	0,24
	8	550	600,00	0,23	2,70	2,76	0,18
	10	550	600,00	0,23	2,71	2,76	0,14
C46.10	0	550	600,00	0,23	2,59	2,76	0,59
	2	550	600,00	0,23	2,61	2,76	0,49
	4	550	600,00	0,23	2,68	2,76	0,26
	6	550	600,00	0,23	2,69	2,76	0,19
	8	550	600,00	0,23	2,71	2,76	0,11
	10	550	600,00	0,23	2,72	2,76	0,14

C49.10	0	550	600,00	0,23	2,57	2,76	0,63
	2	550	600,00	0,23	2,62	2,76	0,44
	4	550	600,00	0,23	2,66	2,76	0,27
	6	550	600,00	0,23	2,70	2,76	0,23
	8	550	600,00	0,23	2,71	2,76	0,14
	10	550	600,00	0,23	2,72	2,76	0,15

TABELA 22 – Cálculo do volume de gás das amostras (princípio de Arquimedes) (continuação).

Fusão	Amostra	Cálculo do k			Cálculo Volume de gás		
		Pressão de ensaio (mmHg)	Temperatura solidificação (°C)	k	Densidade aparente da amostra (g/cm ³)	Densidade teórica (g/cm ³)	Volume de gás (ml/100g)
C52.10	0	550	600,00	0,23	2,57	2,76	0,60
	2	550	600,00	0,23	2,59	2,76	0,48
	4	550	600,00	0,23	2,63	2,76	0,32
	6	550	600,00	0,23	2,67	2,76	0,23
	8	550	600,00	0,23	2,70	2,76	0,15
	10	550	600,00	0,23	2,71	2,76	0,12
C59.10	0	550	600,00	0,23	2,58	2,76	0,56
	2	550	600,00	0,23	2,61	2,76	0,45
	4	550	600,00	0,23	2,66	2,76	0,33
	6	550	600,00	0,23	2,69	2,76	0,24
	8	550	600,00	0,23	2,71	2,76	0,14
	10	550	600,00	0,23	2,72	2,76	0,12
C62.10	0	550	600,00	0,23	2,57	2,76	0,56
	2	550	600,00	0,23	2,60	2,76	0,45
	4	550	600,00	0,23	2,65	2,76	0,31
	6	550	600,00	0,23	2,69	2,76	0,23
	8	550	600,00	0,23	2,71	2,76	0,20
	10	550	600,00	0,23	2,71	2,76	0,15
C67.10	0	550	600,00	0,23	2,57	2,76	0,56
	2	550	600,00	0,23	2,59	2,76	0,46
	4	550	600,00	0,23	2,64	2,76	0,30
	6	550	600,00	0,23	2,68	2,76	0,18
	8	550	600,00	0,23	2,70	2,76	0,16
	10	550	600,00	0,23	2,71	2,76	0,11

C70.10	0	550	600,00	0,23	2,57	2,76	0,58
	2	550	600,00	0,23	2,59	2,76	0,50
	4	550	600,00	0,23	2,63	2,76	0,36
	6	550	600,00	0,23	2,67	2,76	0,23
	8	550	600,00	0,23	2,70	2,76	0,15
	10	550	600,00	0,23	2,71	2,76	0,11

De igual forma, os resultados obtidos resultante da utilização das densidades calculadas pelo princípio de Arquimedes foram no sentido de uma diminuição do volume de gás ao longo do tempo de desgasificação. O gráfico da Figura 39 indica isso mesmo.

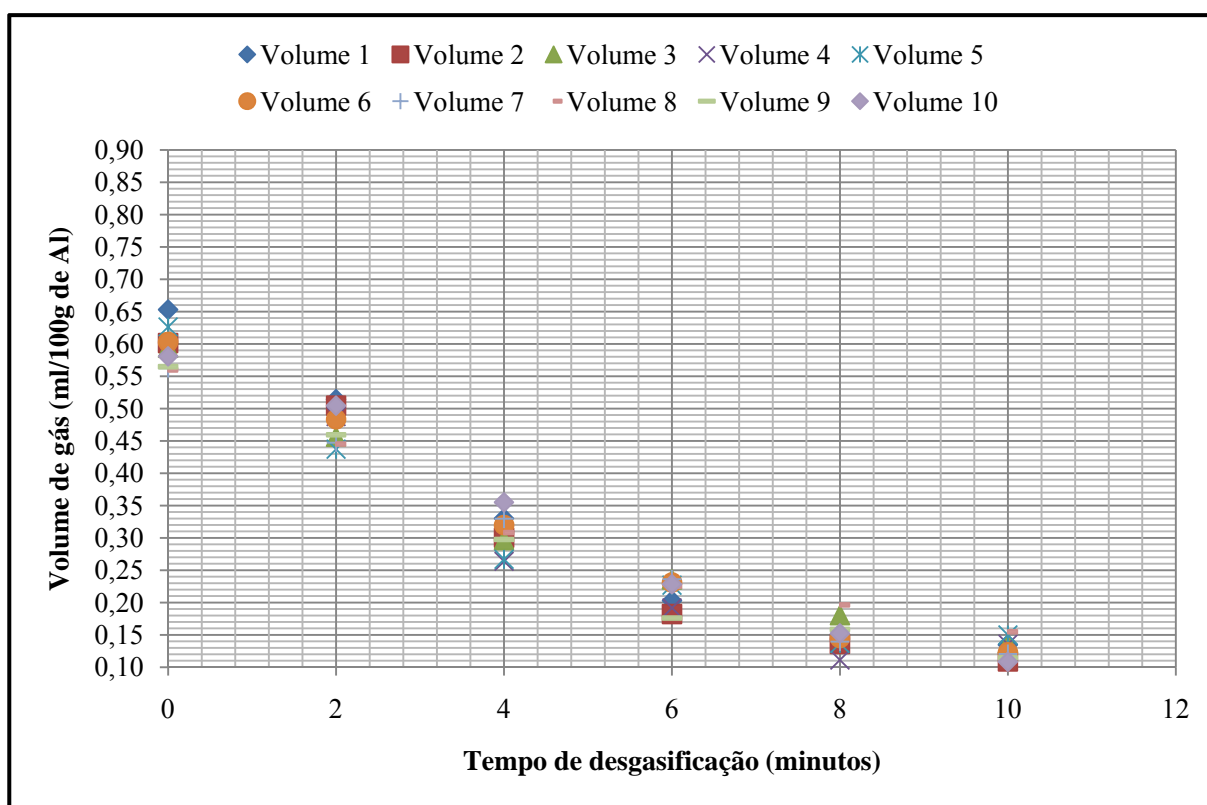


FIGURA 39 – Gráfico volume de gás em função do tempo de desgasificação.

TABELA 23 – Valores médios do volume de gás das amostras.

Médias Volume de gás (Princípio de Arquimedes)						
S/	2	4	6	8	10	
	0,58	0,49	0,33	0,23	0,17	0,14
Redução		0,10	0,15	0,11	0,05	0,03

Através da Tabela 24 é possível dizer que não existe uma diferença significativa entre as duas estimativas do volume gás. Os dois métodos de cálculo da densidade são muito próximos um do outro, revelando que a utilização de um dos métodos ou de outro não irá prejudicar o ensaio de Straube-Pheiffer.

TABELA 24 – Valores máximos e mínimos do volume de gás nos dois métodos.

Volume de gás (ml/100g de Al)		
	Valores Máximos	Valores Mínimos
1	0,61	0,12
2	0,65	0,11

4.4 ANÁLISE PAQI

Pelo programa PAQI distinguir-se dois tipos de análise: quantitativa e pela visualização das imagens obtidas.

4.4.1 ANÁLISE QUANTITATIVA

Na análise quantitativa foi determinado a percentagem, circularidade e comprimento dos poros contidos nas amostras.

Percentagem de poros

Pela análise é possível observar que existe uma diminuição da percentagem de poros com o aumento do tempo de desgasificação. Indicando assim a eficiência da técnica de desgasificação utilizada.

De referir, que os valores da percentagem de poros são elevados porque as áreas analisadas são bastante pequenas, aproximadamente $4,38E+10 \mu\text{m}^2$, o que leva a um erro de análise maior.

TABELA 25 – Médias da percentagem de poros dos diferentes tempos de desgasificação.

Médias	
Amostras	%Poros
0	66,12

2	50,66
4	39,47
6	33,38
8	17,97
10	14,31

Circularidade

Quanto à circularidade, os poros assumem uma geometria elíptica. Este parâmetro é o cociente entre a altura e o comprimento do poro, assim quanto mais próximo de 1 mais circular será o poro. Neste caso encontra-se mais próximo do 0,5 o que indicia um poro com a forma de uma elipse. Pelas médias das amostras com tempos de desgasificação diferentes observa-se que a geometria do poro não se altera com o tempo de desgasificação.

TABELA 26 – Média da circularidade dos diferentes tempos de desgasificação.

Médias	
Amostras	Circularidade (μm)
0	0,62
2	0,62
4	0,64
6	0,63
8	0,63
10	0,65

Comprimento

O comprimento dos poros diminui à medida que o tempo de desgasificação aumenta. Tal comportamento significa que existe uma diminuição do tamanho dos poros.

TABELA 27 – Médias dos comprimentos dos diferentes tempos de desgasificação.

Médias	
Amostras	Comprimento (μm)
0	39,67
2	35,40
4	31,28
6	31,52

8	28,38
10	27,96

4.4.2 IMAGENS PAQI

Através de imagens com as abaixo mostradas é possível ao programa PAQI fazer uma análise quantitativa das amostras. Esta análise é baseada na amostragem obtida pelos diferentes campos observados.

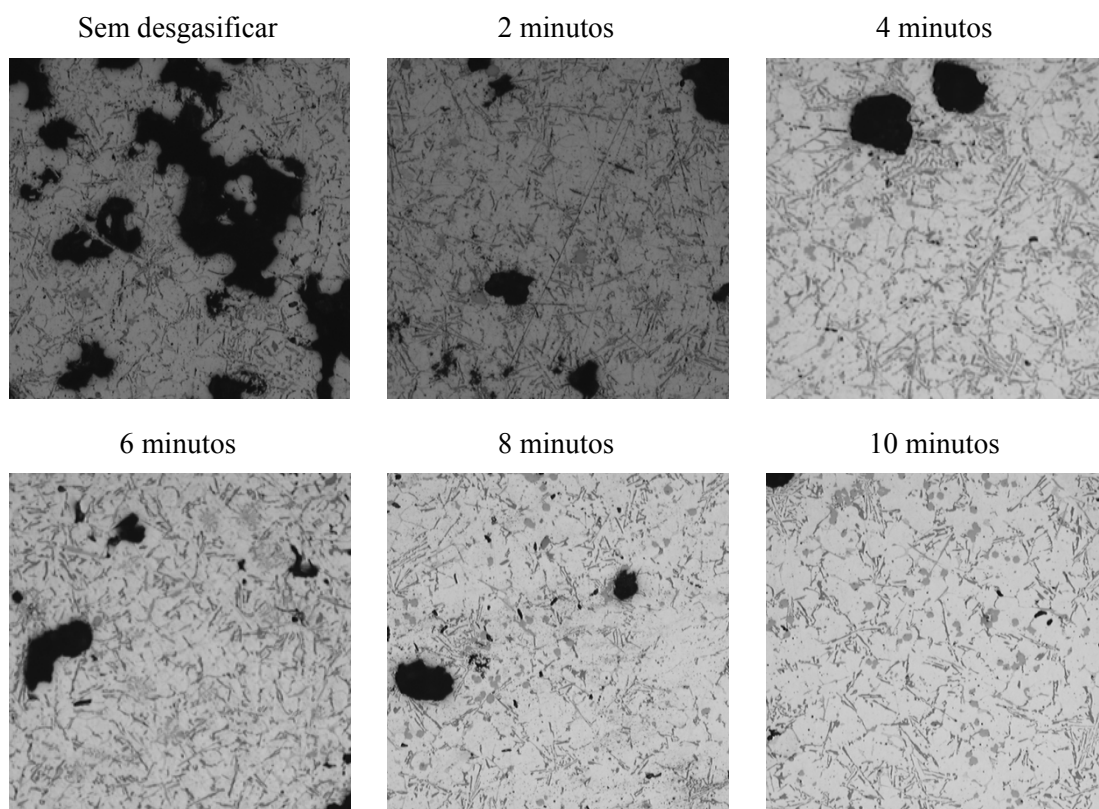
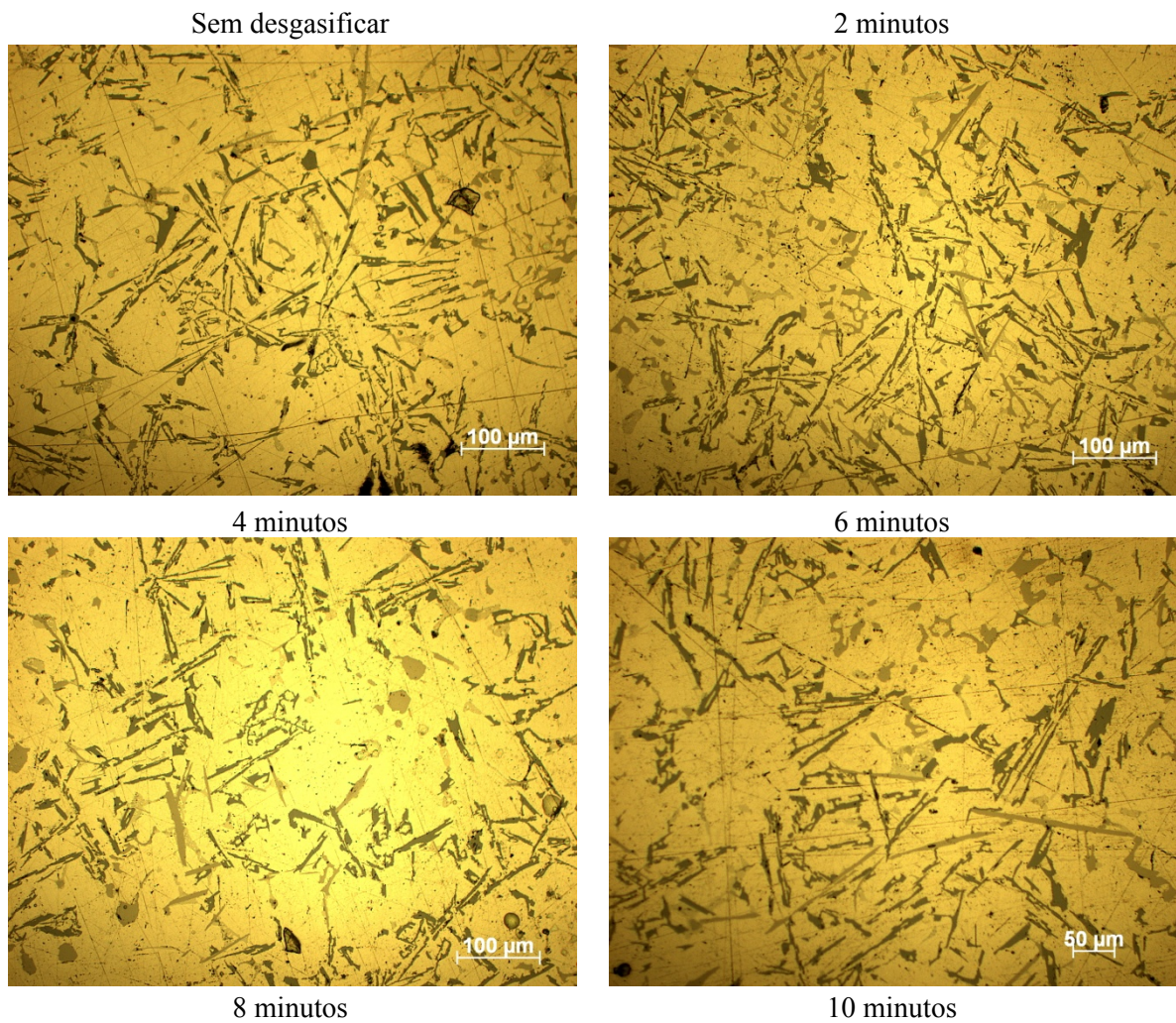


Figura 40 – Sequência de imagens do PAQI em função do tempo de desgasificação (ampliação 5X).

4.5 MICROESTRUTURAS

Ao longo do tempo de desgasificação não se observa nenhuma alteração relevante na microestrutura das diferentes amostras. Observa-se a presença de inclusões nas amostras recolhidas.



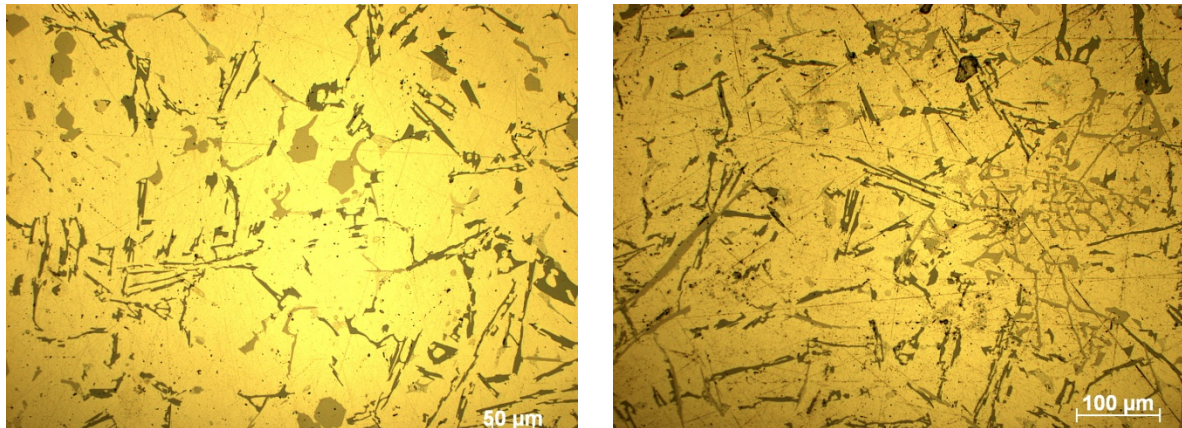
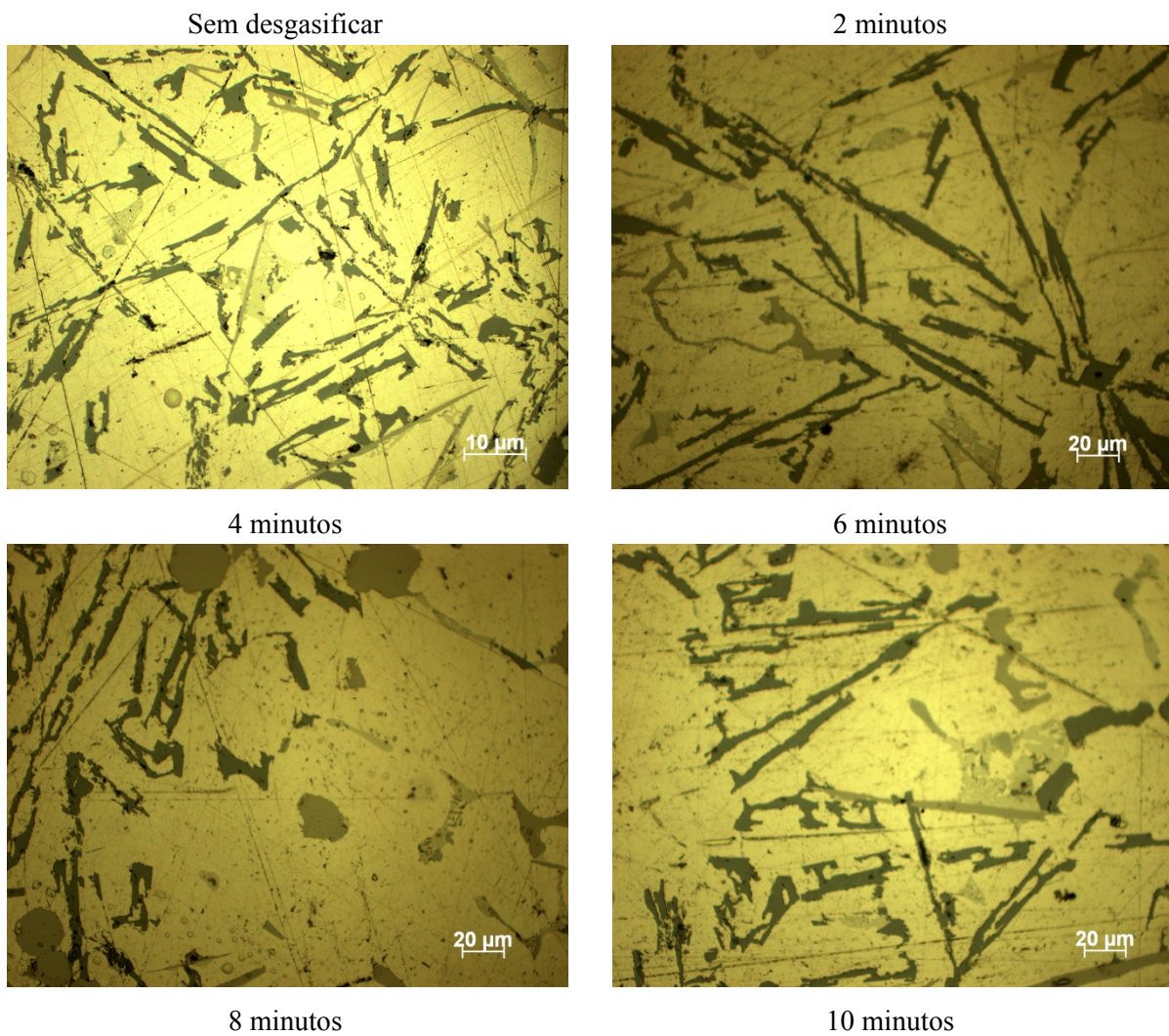


FIGURA 41 – Sequência de microestruturas vs tempo de degasificação.



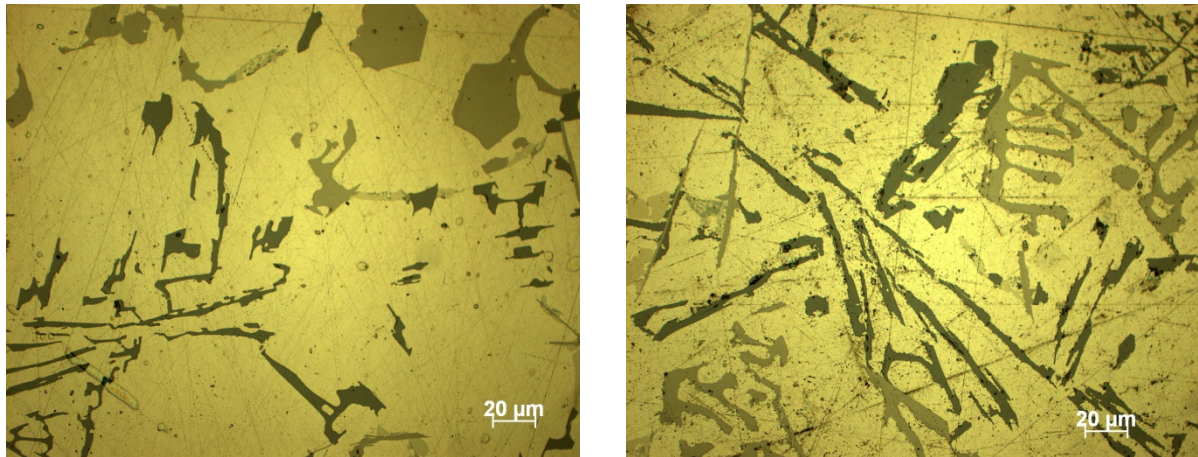
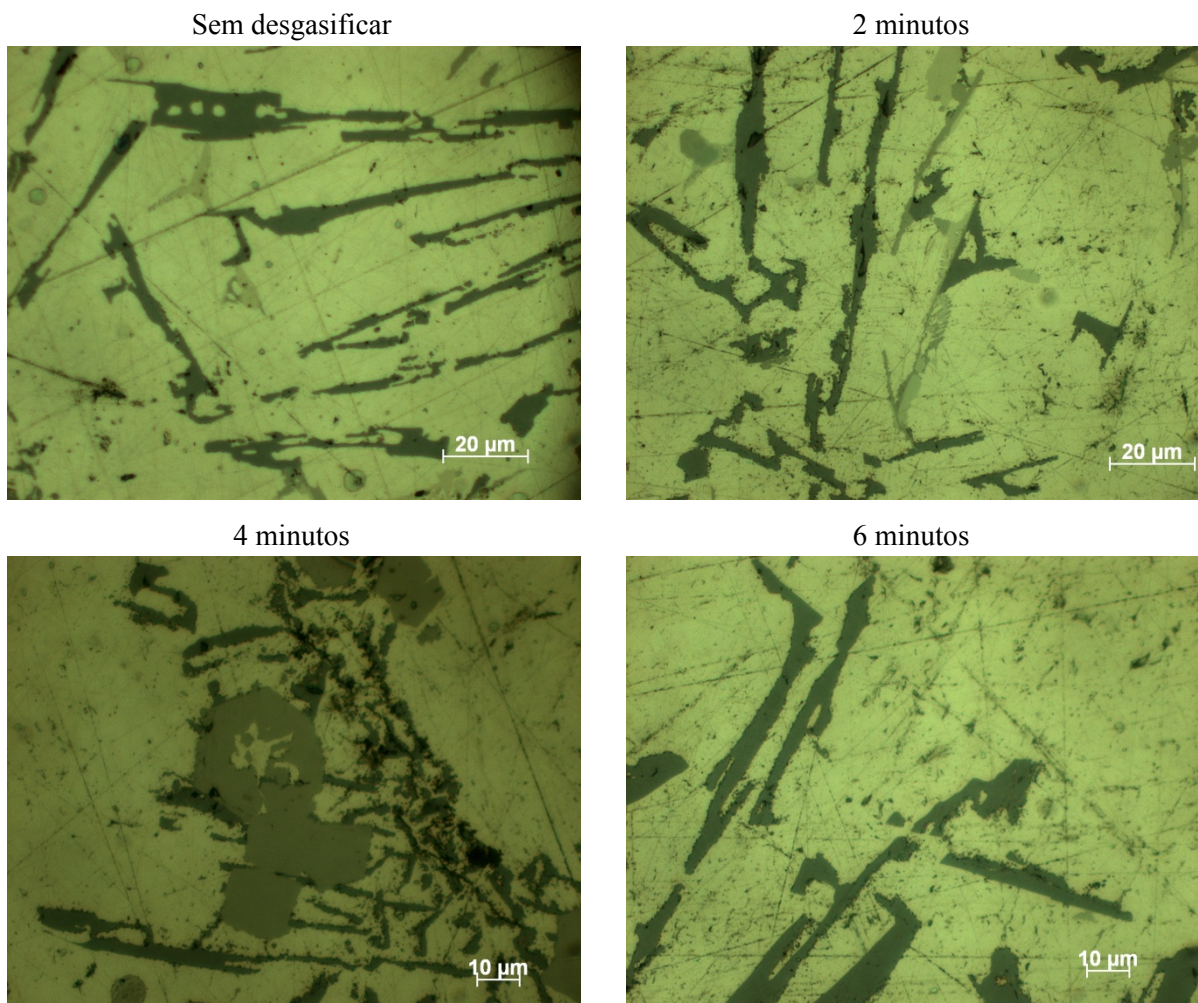


FIGURA 42 – Sequência de microestruturas vs tempo de desgasificação.



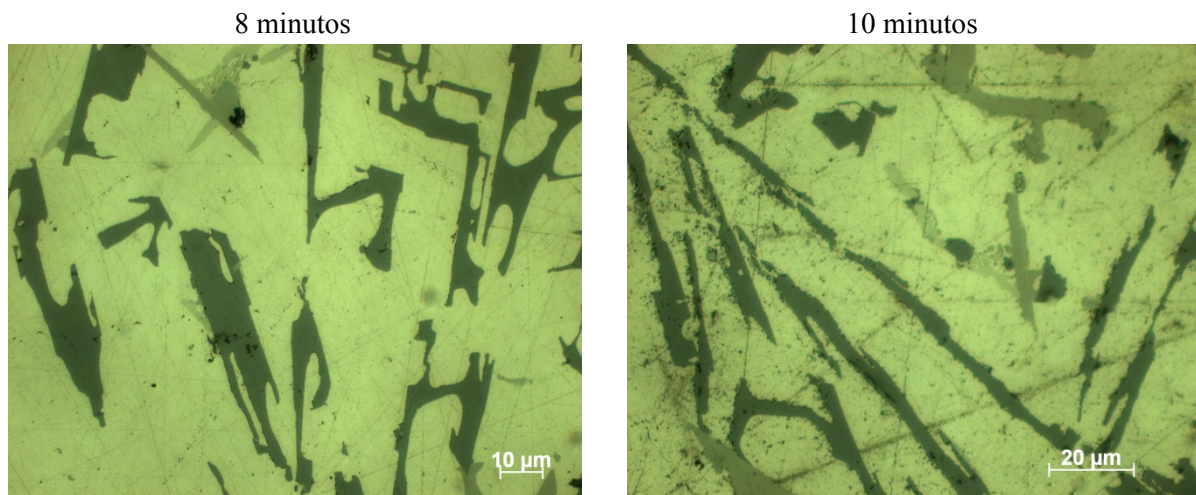


FIGURA 43 – Sequência de microestruturas com o tempo de degasificação.

5 CONCLUSÕES

A empresa Recial não possuía, no início deste trabalho de Mestrado, um processo controlado para a técnica de degasificação, servindo este trabalho para dar início a este processo.

1. Com base na discussão dos resultados, apresentados da página 38 à 52 pode concluir-se que se obteve o tempo tecnicamente ideal de degasificação nos banhos de alumínio nos fornos de manutenção de 10 toneladas que é de cerca de 9 minutos. Este tempo foi validado pela Recial e cumpre o objectivo proposto para a realização desta tese de Mestrado.

2. Pode concluir-se que as densidades relativas e absoluta encontram-se muito próximas para as mesmas amostras, não interferindo assim na estima do volume de gás.

3. A densidade das amostras no final da degasificação é de $2,72\text{g/cm}^3$, o que é bastante aceitável considerando a densidade teórica da liga como $2,76\text{ g/cm}^3$.

4. O volume de gás estimado das amostras no final da degasificação é de $0,18\text{ ml/100g}$ de alumínio.

5. A relação entre a densidade e o teor de gás estimado nas amostras tem um declive negativo indicando que à medida de a densidade aumenta, o volume de gás diminui.

6. A análise quantitativa permitiu confirmar os resultados obtidos nos ensaios efectuados anteriormente nas amostras.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após a realização deste trabalho, surgem algumas questões ou temas passíveis de estudo.

Relativamente às perdas de fusão nos fornos rotativos deveria ser feito um estudo sobre a influência do fundente na fusão de sucatas de alumínio. Este parâmetro pode estar relacionado com o aumento ou diminuição das perdas de fusão e com a absorção de gases forno.

Seria também importante analisar a forma de controlar e de remoção das inclusões (pontos duros) dos banhos metálicos, que é um dos principais defeitos encontrados em fundição injectada de alumínio (principais clientes da Recial). As inclusões, geralmente de grande dureza e de tamanho considerável, são colocadas em evidência nas operações de maquinagem. Para além das consequências negativas na maquinagem pode também aumentar o teor de hidrogénio dissolvido no metal líquido assim como produzir depósitos nos cadinhos, originar porosidades nas peças, aumentar o desgaste da moldação, aumentar a fragilidade, diminuir a resistência mecânica e à corrosão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Manual da Qualidade da Recial, Edição F, 2010

[2] Schlesing, Mark E. "Aluminium Recycling." 2-8: editado por CRC Press, 2007.

[3] Process Guidance Note 2/5 (4) - Secretary of State's Guidance for Hot and Cold Blast Cupola, and Rotary Furnaces, 2004.

[4] Manual de utilização dos fornos da Recial, 2009

[5] Mesquita, Adolfo Pinto Dá. Tecnologias De Fundição De Ligas De Alumínio. editado por Instituto Nacional de Investigação Industrial, 1971.

[6] Neff, David V. "Casting." In Metals Handbook, editado por ASM International, 964-1078, 1992.

[7] Kaufman, J. Gilber, and Elwin L. Rooy. "Aluminum Alloy Casting: Properties, Processes, and Applications." editado por ASM International, 14-17, 2004.

[8] Jorstad, John L., and Wayne M. Rasmussen. "Aluminum Casting Technology." editado por Donna L. Zalensas, 19-37: American Foundrymen's Society, Inc, 1993.

[9] Gruzleski, John E., and Bernard M. Closset. "The Treatment of Liquid Aluminum-Silicon Alloys." editado por Inc American Foundrymen's Society, 143-212. Illinois, 1990.

[10] Otsuka, Riyotatsu. "Physical Metallurgy and Process." In Handbook of Aluminum, editado por George E. Totten and D. Scott MacKenzie, 643-63: Marcel Dekker Inc., 2003.

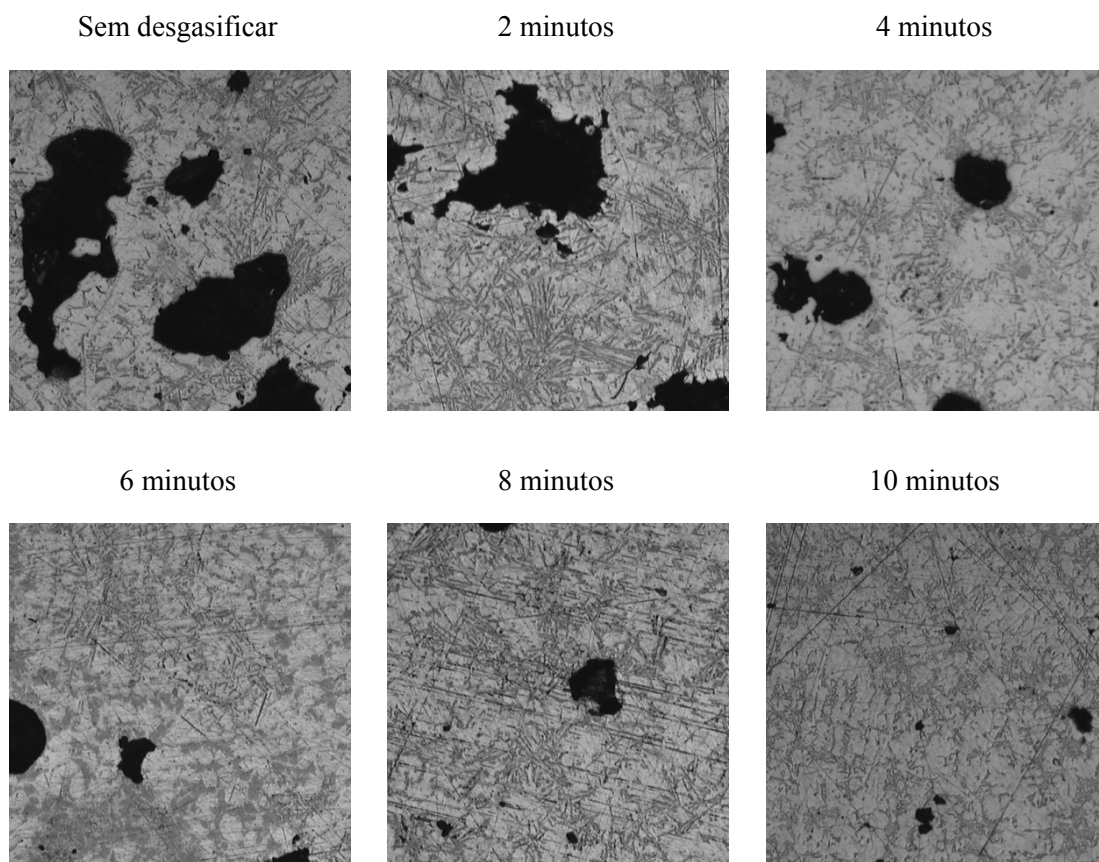
[11] Campbell, John, and Richard A. Harding. "The Liquid Metal." TALAT Lecture 3202,no. EAA - European Aluminium Association, 1994.

[12] Queirós, M.A., M.O. Simões, and T.S. Simões. Química Em Contexto – Física E Química A. editado por Porto Editora, 2005.

ANEXOS

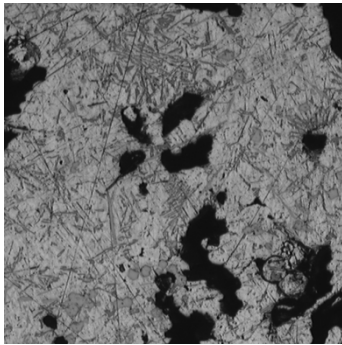
São apresentados as fotomicrografias aquando da análise no programa PAQI. O conjunto de imagens é ilustrativo da forma que é quantificado a percentagem de poros. Observa-se que existe uma diminuição de poros e do tamanho dos mesmos ao longo da desgasificação.

As restantes imagens são também desta análise mas de fusões diferentes.

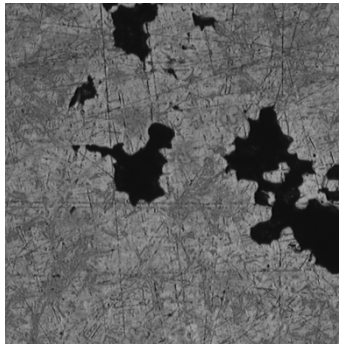


Sequência de imagens do PAQI vs tempo de desgasificação (ampliação 5X).

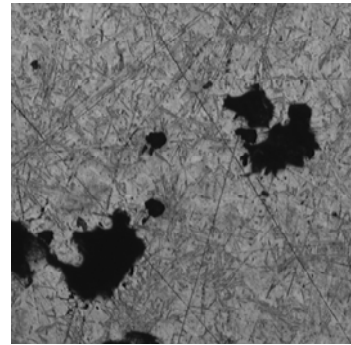
Sem desgasificar



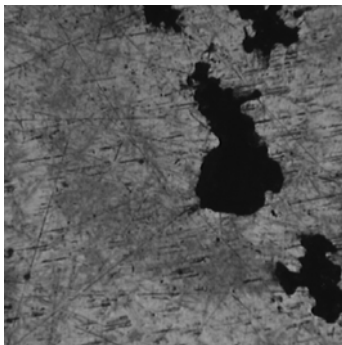
2 minutos



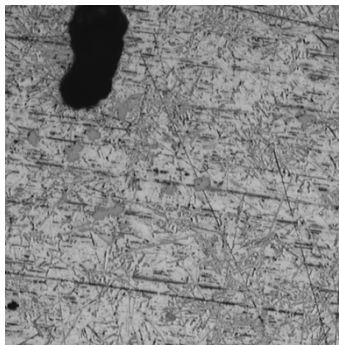
4 minutos



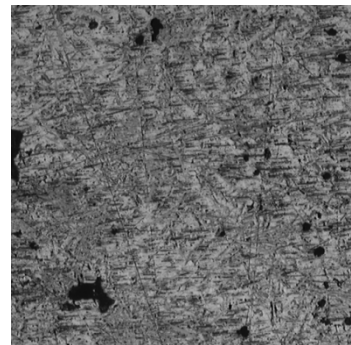
6 minutos



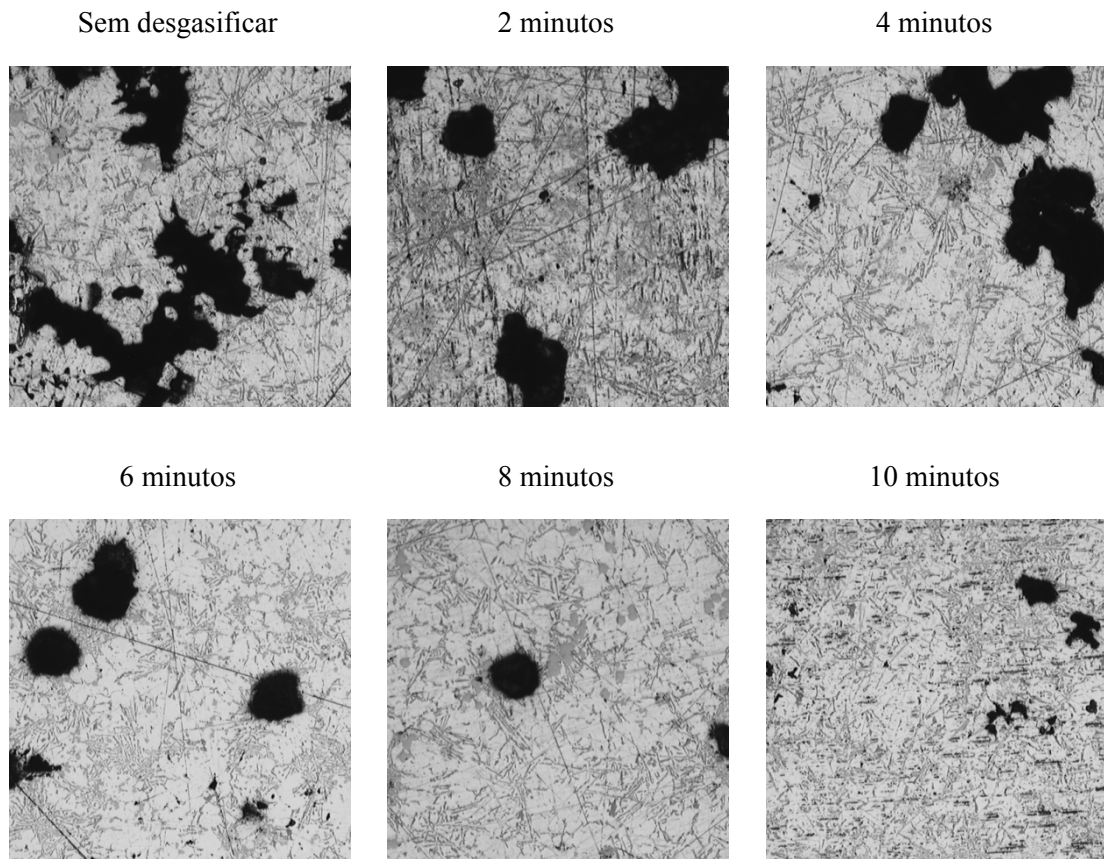
8 minutos



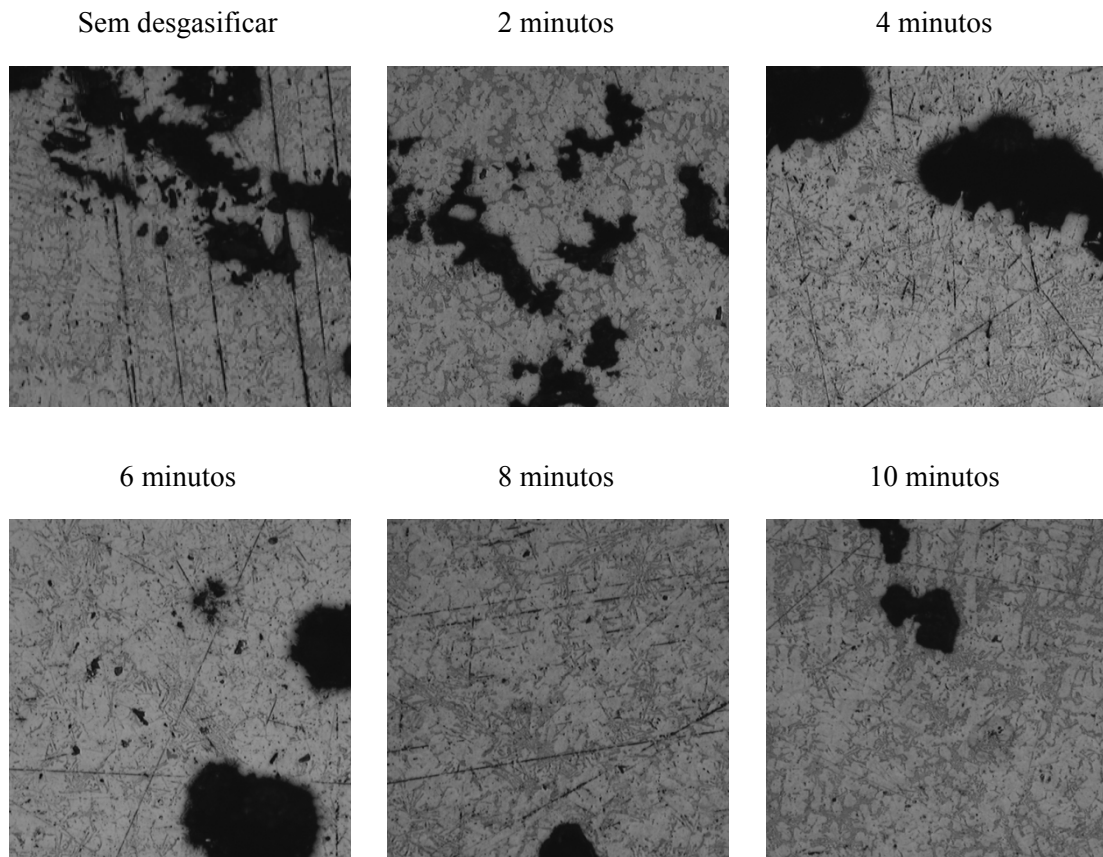
10 minutos



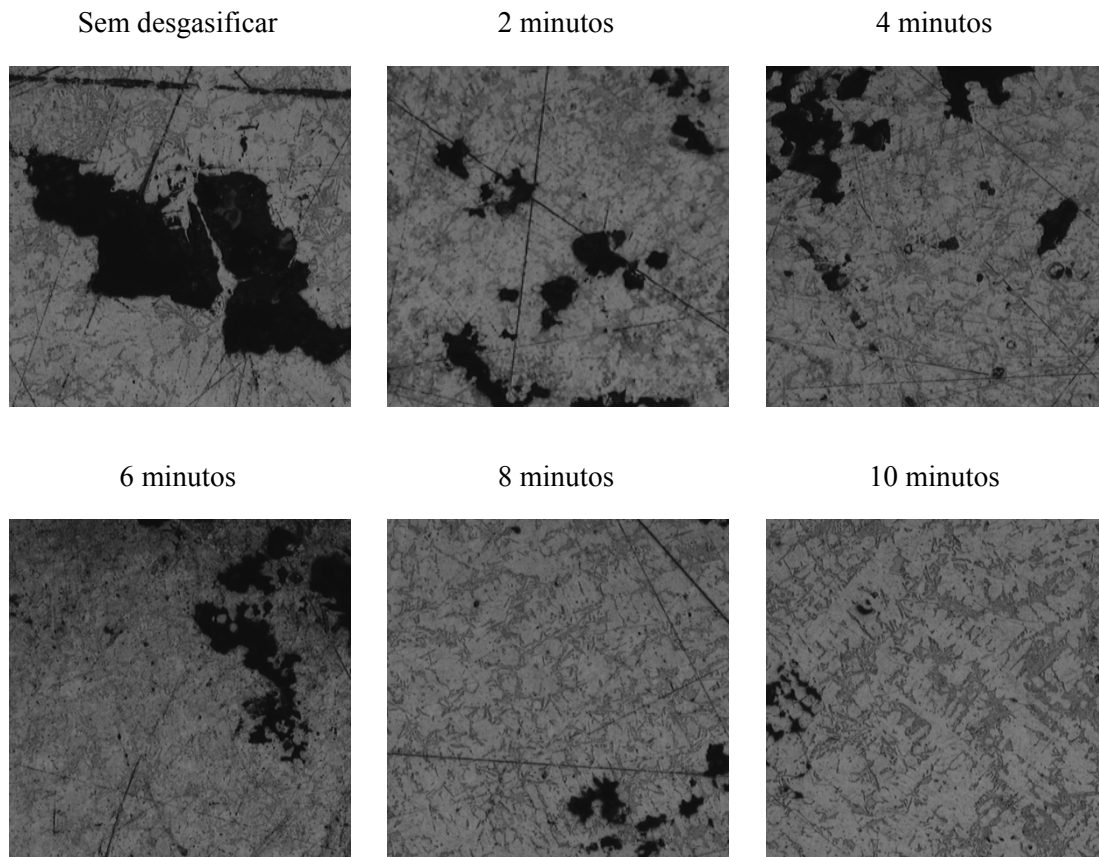
Sequência de imagens do PAQI vs tempo de desgasificação (ampliação 5X).



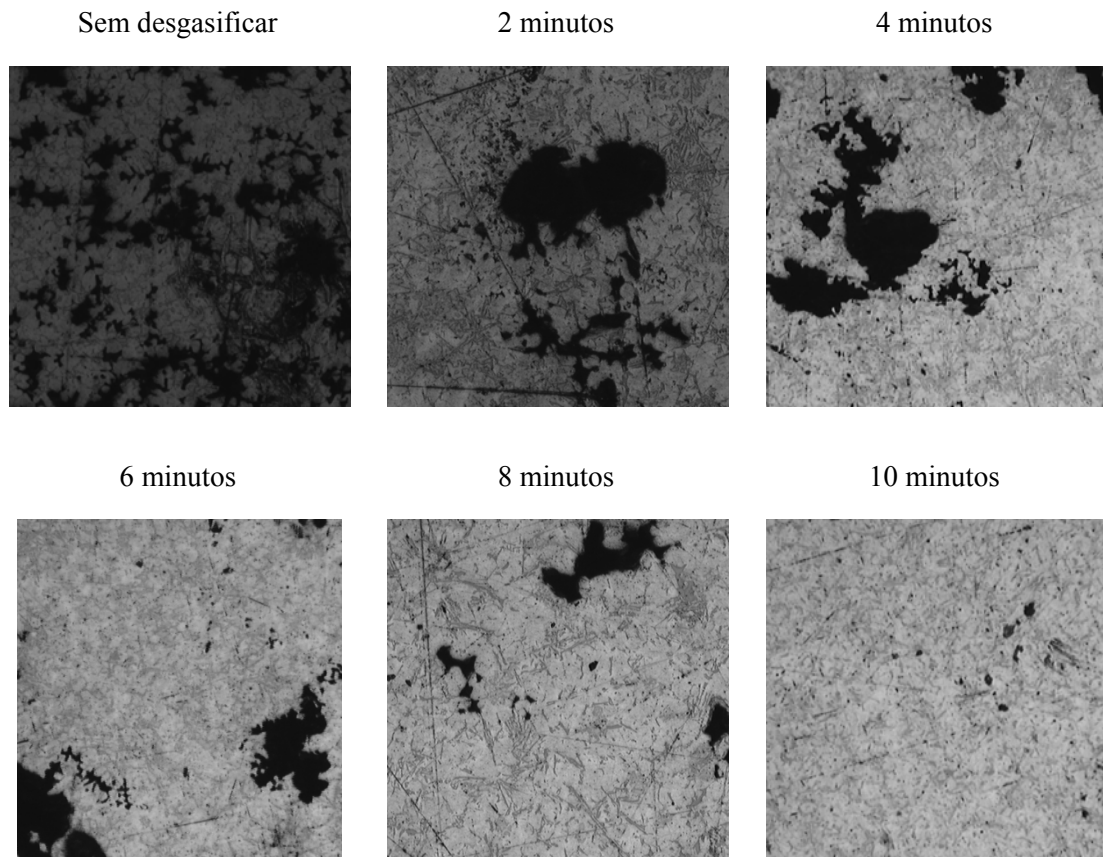
Sequência de imagens do PAQI vs tempo de desgasificação (ampliação 5X).



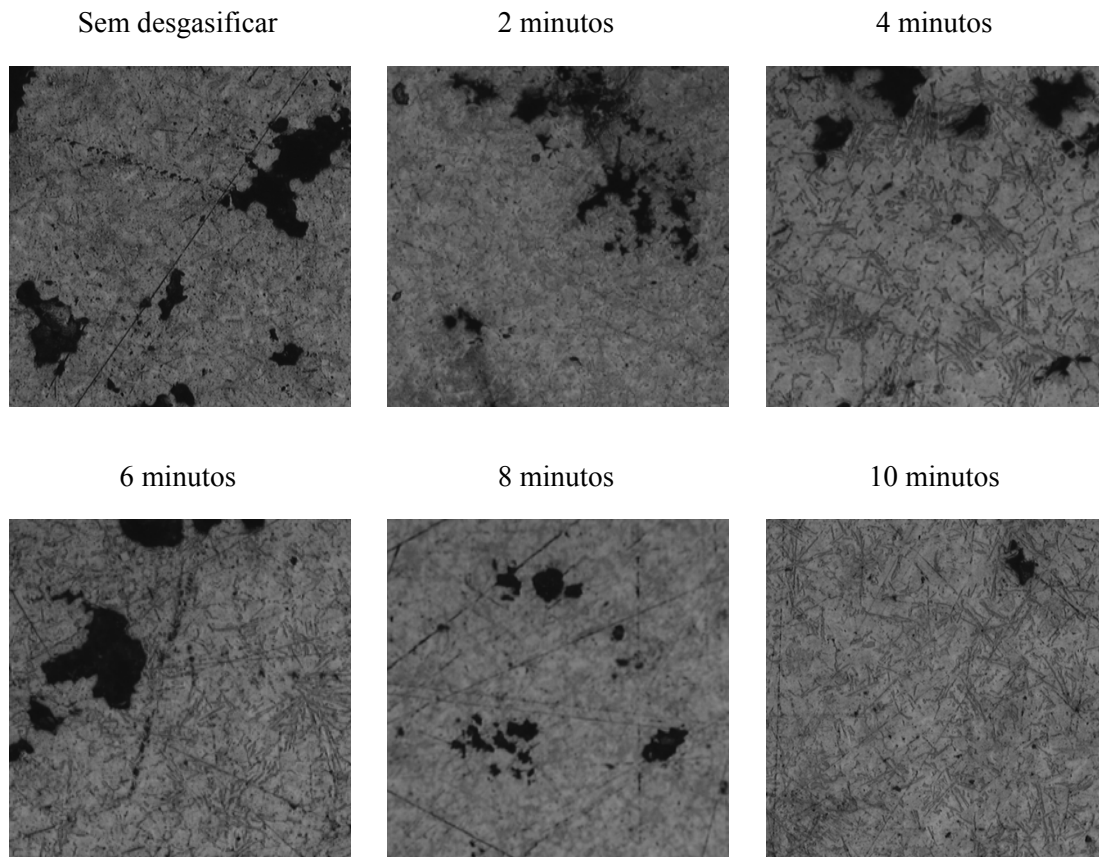
Sequência de imagens do PAQI vs tempo de desgasificação (ampliação 5X).



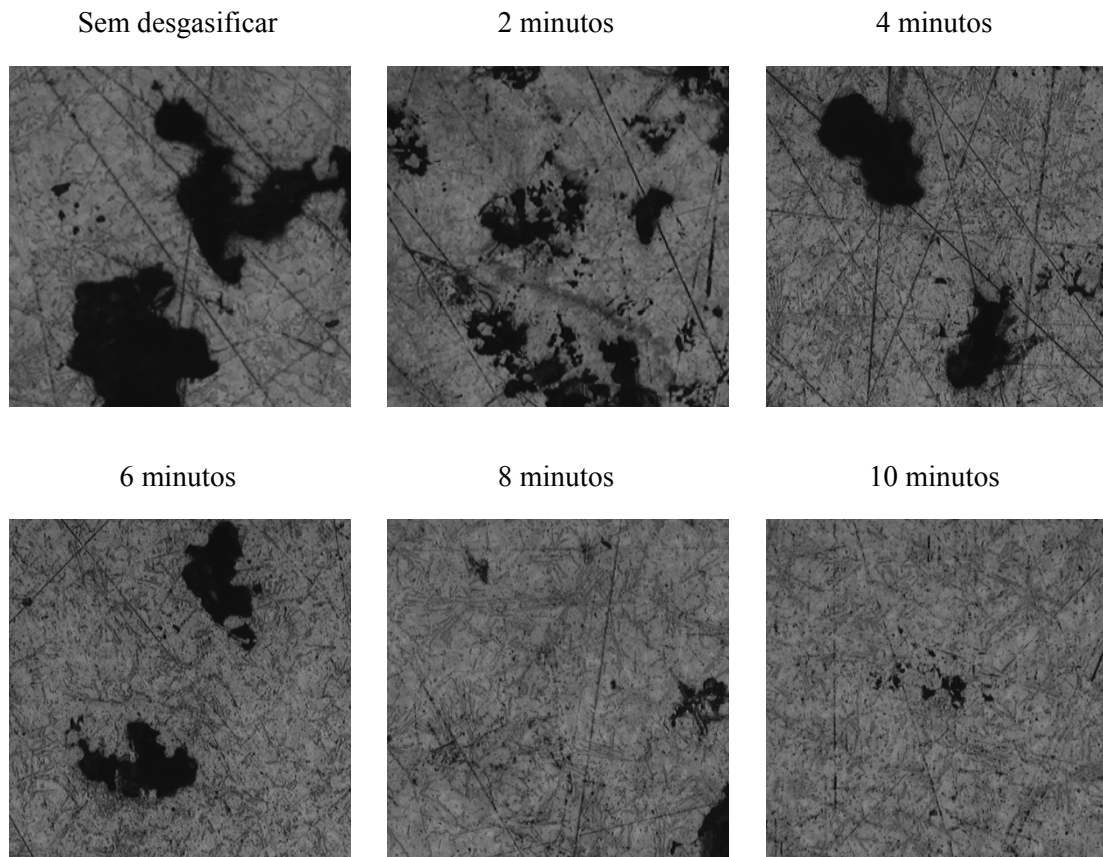
Sequência de imagens do PAQI vs tempo de desgasificação (ampliação 5X).



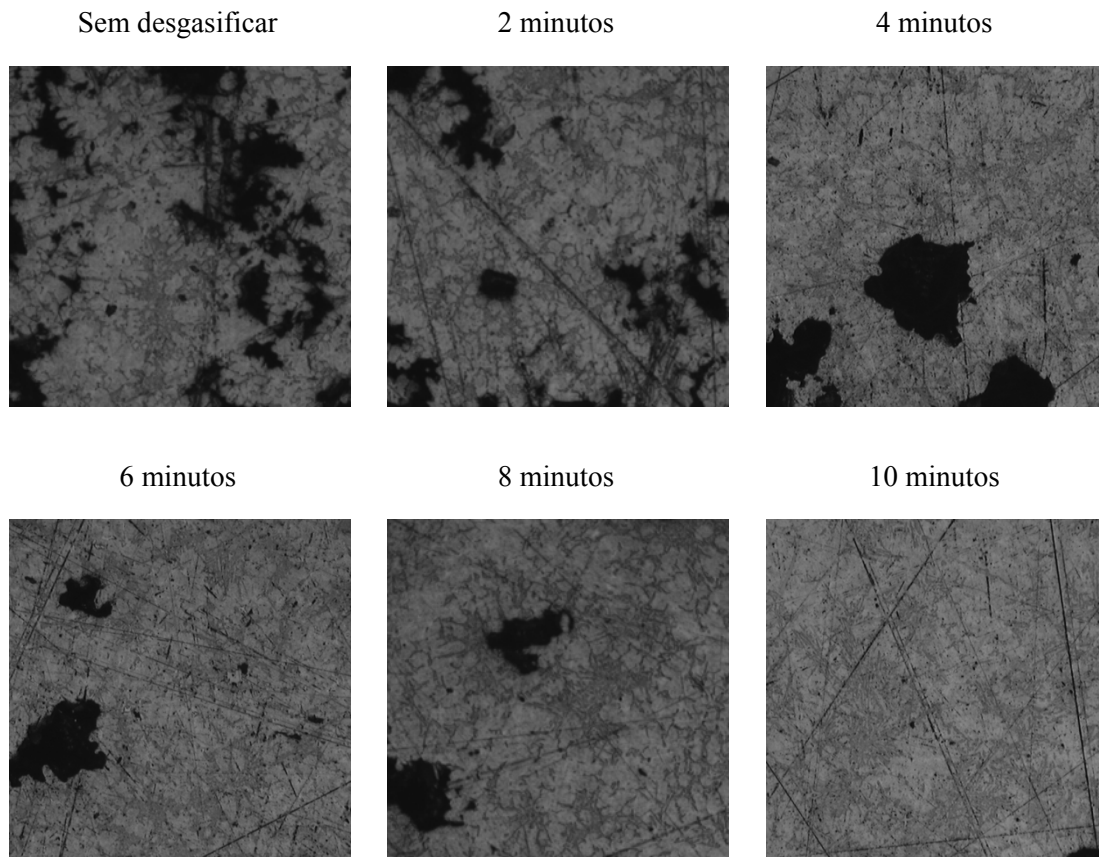
Sequência de imagens do PAQI vs tempo de desgasificação (ampliação 5X).



Sequência de imagens do PAQI vs tempo de desgasificação (ampliação 5X).



Sequência de imagens do PAQI vs tempo de desgasificação (ampliação 5X).



Sequência de imagens do PAQI vs tempo de desgasificação (ampliação 5X).

Codificação atribuída aos diferentes tipos de resíduos de alumínio usada na Recial.

CLASSIFICAÇÃO	DENOMINAÇÃO
A1.1	Retalho novo branco de Alumínio puro, limpo ($\geq 0,20$)
A1.1.2	Chapa Off-set
A1.1.3	Cabo de Alumínio limpo
A1.1.4	Cabo de Alumínio cortado miúdo (Chopped) limpo
A1.1.5	Cabo de Alumínio com alma d' Aço
A1.1.6	Cabo de Alumínio revestido a PVC
A1.1.7	Cabo de Alumínio queimado com Ferro e Cobre
A1.2	Retalho novo colorido de Alumínio puro, limpo ($\geq 0,20$)
A2.1	Perfil branco novo, limpo
A2.2	Perfil colorido, limpo
A3.1	Retalho novo de Alumínio / Magnésio
A3.2	Conserveiro
A4.0	Alumínio novo fino, sem revestimento a plástico ou papel ($< 0,05$)
A5.1	Retalho novo de Alumínio (Lote Misto)
A7.1	Retalho de Alumínio com elevado teor de Zinco
A8.1	Retalho de Alumínio com baixo teor de Cobre, novo limpo
B1.1	Vasilhame e Chapa
B2.1	Chapa de Alumínio / Manganês (Chapa de Cobertura)
B3.1	Chapa de Alumínio / Magnésio
B3.2	UBC - Latas de bebidas usadas
B4	Radiadores de Alumínio e Cobre
B5	Alumínio não fundido, com Ferro ou outro qualquer
B6	Chapa de Avião
C	Alumínio Fundido
D1	Resíduos de Fundição (Aparas, Gitos)
D2	Jorra
D4	Resíduos de Alumínio da limpeza dos Fornos de Afinação
D5	Resíduos de Alumínio que saem das Escórias Salinas
D6	Resíduos das Fusões (Lingoteira)
E	Limalhas de Alumínio
G1	Alumínio Fragmentado (Shredder)
H1	Lingote para Refundir
H2	Alumínio Fundido em blocos ou pedaços, de composição indefinida
Cárter/Mg	Cárter de Magnésio