

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA

RAFAEL HENRIQUE MARTINS ROSSI

**ANÁLISE DA MICROESTRUTURA E DA MICRODUREZA DA LIGA
A.380 TIXOCONFORMADAS COM ADIÇÃO DE REFINADOR E
MODIFICADOR**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2019

RAFAEL HENRIQUE MARTINS ROSSI

**ANÁLISE DA MICROESTRUTURA E DA MICRODUREZA DA LIGA
A.380 TIXOCONFORMADAS COM ADIÇÃO DE REFINADOR E
MODIFICADOR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada como requisito parcial à obtenção do título Bacharel em Engenharia Mecânica, da Coordenação de Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Augusto Lourençato

PONTA GROSSA

2019



TERMO DE APROVAÇÃO

**ANÁLISE DA MICROESTRUTURA E DA MICRODUREZA DA LIGA A.380
TIXOCONFORMADAS COM ADIÇÃO DE REFINADOR E MODIFICADOR**

por

RAFAEL HENRIQUE MARTINS ROSSI

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 25 de novembro de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Luciano Augusto Lourençato
Orientador

Prof. Dr. Hipólito Domingos Carvajal Fals
Membro Titular

Profa. Ma. Sandra Mara Kaminski Tramontin
Membro Titular

Prof. Dr. Marcos Eduardo Soares
Responsável pelos TCC

**Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de
Carvalho**
Coordenador do Curso

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a meus pais Antônio José Rossi e Maria Aparecida Martins Rossi por serem meu exemplo, sempre me auxiliando e dando o devido suporte em toda a minha vida. Agradeço também a minha irmã Maria Gabriela Martins Rossi que sempre esteve comigo desde os meus 3 anos de idade. Agradeço minha família avó, tios(as), primos(as), ... que sempre esteve disposta a ajudar quando necessário.

Agradeço ao professor Dr. Luciano Augusto Lourençato pela orientação e a fundação Araucária por patrocinar o projeto de pesquisa precursor ao TCC, no qual obtive toda a base de conhecimento para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a todos os amigos que obtive durante minha jornada na UTFPR - PG no qual sem eles essa trilha seria sem dúvidas mais caótica e complexa. Um agradecimento especial aos amigos do “QG” no qual me ajudaram em muito na execução do trabalho e do TCC, na vida pessoal e profissional.

Agradeço aos amigos do Rotaract, no qual tive a oportunidade de desenvolver-me pessoalmente e profissionalmente, o que em muitos momentos as lições aprendidas durante minha participação do projeto foram utilizadas para a gestão desse trabalho.

Por fim, agradeço à todas as pessoas que me auxiliaram nessa jornada até a conclusão desse trabalho, que marca o início do fim de minha graduação de Engenharia Mecânica. Gostaria de citar os nomes de todos aqueles envolvidos que me auxiliaram de alguma forma e deram condições necessárias de chegar até esse ponto, contudo sei que não seria justo pois me esqueceria de alguns nomes e seria uma lista muito longa, sendo assim meu obrigado a todas as pessoas que me ajudaram a chegar até a universidade (Cursinho Desafio, Projeto Guri, E.E Prof. Atílio Innocenti, E. M. Prof. Augusto Reis, Totus, ...) e a todas as pessoas que me ajudaram a chegar até o final da faculdade, pois sempre me lembrarei dos momentos engraçados, dos tristes, dos de superação, dos alegres, daqueles aprovações com 6 de média, das noites viradas estudando, jogando, das conversas, das besteiras, ... agradeço também a todos por terem atorado as minhas piadas e trocadilhos de alto nível. A vocês, a todos vocês meu obrigado!

RESUMO

Rossi, Rafael H. M. **Análise da microestrutura e da microdureza da liga A.380 tixoconformadas com adição de refinador e modificador.** 2019 57 P. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2019

O desenvolvimento de técnicas e processos de fabricação mecânica vêm progredindo e atualizando-se com o passar dos anos. Dentre eles o processo de tixoconformação, sendo um processo de fabricação mecânica em que utiliza um metal no estado semissólido, onde segundo Batalha (2003): “A temperatura é escolhida em geral para uma proporção de 60% de fase sólida e 40% de fase líquida”. Ao atingir a temperatura esperada, o metal é pressionado em uma matriz, obtendo formas complexas apenas com o uso do processo de conformação. Segundo Batalha (2003) as vantagens do processo são o curto tempo para finalização do item, possibilidade de confeccionar peças com geometrias complexas, menor porosidade e segregação já que o estado semissólido favorece a difusão e solubilidade. Contudo o processo apresenta algumas desvantagens, como o tempo de maleabilidade do metal ser curto, custos elevados e o processo restritos apenas a algumas ligas. Um dos metais mais comuns empregados no processo de tixoconformação é o alumínio por conta do seu custo, reciclabilidade e capacidade de ser trabalhado como semissólido. Assim, a liga de alumínio A380 de origem reciclada foi ao processo de tixoconformação, foi possível realizar todas as etapas e obter valores de microdureza, metalografia e dados de tensão por deformação. Assim foi possível analisar e entender que os elementos adicionados na liga (Titânio e Estrôncio) afetam a microestrutura e permitem alterar valores como a tensão máxima suportada bem como sua microdureza, além de observar um a existência de um ponto de otimização para obter resultados mais elevados

Palavras-chave: Semissólidos, Tixoconformação, Alumínio, Metalografia, Microdureza, Ligas Metálicas.

ABSTRACT

Rossi, Rafael H. M. **Analysis of the microstructure and microhardness of the A380 alloy thixoformed with the addition of refiner and modifier.** 2019 57 P. Work of Conclusion Course (Graduation in Mechanical Engineering) - Federal University of Technology – PARANÁ – Paraná. Ponta Grossa. 2019

The development of mechanical manufacturing techniques and processes has progressed and updated over the years. Among them the thixformation process, being a mechanical manufacturing process in which a metal is used in the semi-solid state, where according to Batalha (2003): “The temperature is generally chosen for a ratio of 60% solid phase and 40% phase. net ”. When it reaches the expected temperature, the metal is pressed into a matrix, obtaining complex shapes only by using the forming process. According to Batalha (2003) the advantages of the process are the short time to finalize the item, the possibility of making pieces with complex geometries, less porosity and segregation since the semi-solid state favors diffusion and solubility. However, the process has some disadvantages, such as the metal's malleability time being short, high costs and the process restricted to only a few alloys. One of the most common metals used in the thixing process is aluminum because of its cost, recyclability and ability to be worked as semi-solid. Thus, the A380 aluminum alloy of recycled origin was thixformed, it was possible to perform all the steps and obtain values of microhardness, metallography and stress data by deformation. This it was possible to analyze and understand that the elements added in the alloy (Titanium and Strontium) affect the microstructure and allow changing values such as the maximum supported stress as well as its microhardness, besides observing the existence of an optimization point to obtain higher results.

Palavras-chave: Semisolids, Thixoforming, Aluminum, Metallography, Microhardness, Metal Alloys.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fonte de alumínio primária de Alumínio por país.....	11
Figura 2- Equipamentos utilizados para ensaio de tração.....	19
Figura 3- Gráfico exemplo de Tensão x Deformação	20
Figura 4 - Exemplo de imagens obtidas por metalografia	21
Figura 5 - Impressões realizadas pelo método de microdureza Vickers em ligas Al-Si fundidas	22
Figura 6 - Fluxograma dos procedimentos.....	23
Figura 7 - Processo de fundição das ligas de alumínio com variação de modificador e refinador.	25
Figura 8 – Usinagem dos tarugos para o processo de tixoconformação	26
Figura 9 - Equipamentos Utilizados para realizar a Tixoconformação (A – Forno a indução / B – Prensa hidráulica).....	27
Figura 10 - Amostras resultantes do processo de tixoconformação com variação de tempo na fase semisólida.....	28
Figura 11 - Etapas de preparação pra usinagem (A - limpeza do sobremetal / B - Amostras limpas / C - Processo de corte / D - Amostra pronta para o processo de torneamento).....	29
Figura 1 - Processo de Usinagem (A - Amostra pré usinagem / B - Peça que sofreu usinagem com torno convencional com castanha de 4 pontos / C - Peças usinada com torno CNC).....	30
Figura 2 - Procedimento de ensaio de tração (a – Posicionamento do ensaio de Tração / b – Amostra pós ensaio de tração).	31
Figura 3 - – Regiões onde foram extraídos as amostras (X - area tracionada (amostra de microdureza) / Y - area não tracionada (amostra de microdureza)/ Z - amostra para metalografia)	31
Figura 4 - Processo de polimento.....	32
Figura 5 - Microscópio ótico durante a realização dos ensaios.....	33
Figura 6 – Microdurômetro durante a realização do ensaio..	34
Figura 18 - Imagem da metalografia das ligas fundidas (A – A380 comercial / B – A380 + Refinador / C - A380 + refinador + 200ppm modificador / D - A380 + refinador + 600ppm modificador)	36
Figura 19. Imagem da metalografia das ligas tixoconformadas (A – A380 comercial / B – A380 + Refinador / C - A380 + refinador + 200ppm modificador - A380 + refinador + 600ppm modificador	
Figura 20 - Ampliação da amostra tipo C com 0 segundos de globularização.....	38
Figura 21 - Imagem da metalografia das ligas tixoconformadas e globularizadas por 30 segundos (A – A380 comercial / B – A380 + Refinador / C - A380 + refinador + 200ppm modificador / D - A380 + refinador + 600ppm modificador)...	39

Figura 22 - Imagem da metalografia das ligas tixoconformadas e globularizadas por 90 segundos (A – A380 comercial / B – A380 + Refinador / C - A380 + refinador + 200ppm modificador / D - A380 + refinador + 600ppm modificador)...	40
Figura 23 – Corpos de prova após ensaio de tração.....	41
Figura 24. - Comportamento das amostras “A” durante o ensaio de tração.....	42
Figura 25 - Comportamento das amostras “B” durante o ensaio de tração.....	43
Figura 26 - Comportamento das amostras “C” durante o ensaio de tração	44
Figura 27 - Comportamento das amostras “D” durante o ensaio de tração	45
Figura 28 - Microdureza do alumínio tixoconformado A (A380).	48
Figura 29 -Microdureza do alumínio tixoconformado B (A380 + Refinador).....	49
Figura 30 - Microdureza do alumínio tixoconformado C (A380 + Refinador + 200 ppm Modificador).....	50
Figura 31. Microdureza do alumínio tixoconformado C (A380 + Refinador + 600 ppm Modificador).	51
Figura 32 - Compilado dos ensaios de microdureza da seção de diâmetro maior.	52
Figura 33- Compilado dos ensaios de microdureza da seção e diâmetro menor..	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Processo esperado na composição das ligas a serem fundidas	24
Tabela 2 - Massa de cada elemento utilizado na fusão de cada liga	24
Tabela 3 - Amostras de tixocoformação.....	28
Tabela 4 - Compilado dos dados de ensaio de tração.	46
Tabela 5 - Microdureza das ligas confeccionas (sem sofrer a tixocoformação) .	46
Tabela 6 - Microdureza das ligas em regiões variadas do corpo de prova de tração.	47

SUMÁRIO

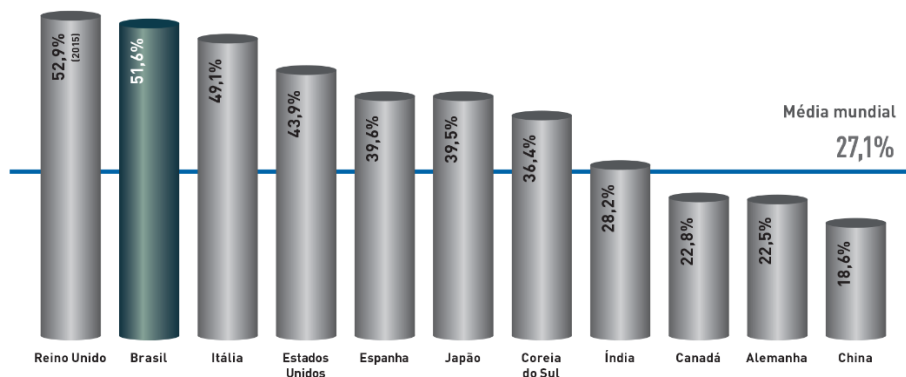
1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVO GERAL	12
1.2	OBJETIVO ESPECIFICO	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	SEMISSÓLIDOS	14
2.2	TIXOCONFORMAÇÃO	15
2.2.1	Vantagens da Tixoconformação	15
2.2.2	Desvantagens da Tixoconformação	16
2.3	LIGA DE ALUMINIO	17
2.4	REFINADORES DE ALUMINIO	17
2.5	ENSAIO DE TRAÇÃO	18
2.6	MICROSCOPIA.....	20
2.7	MICRODUREZA.....	21
3	METODOLOGIA	23
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
4.1	RESULTADOS DAS ANALISES MICROESTRUTURAL	35
4.2	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO	40
4.3	RESULTADOS DE MICRODUREZA	46
5	CONCLUSÃO	55
	REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

Os materiais metálicos acompanham o desenvolvimento do homem, esse uso se intensificou com a chegada das revoluções industriais que romperam com as formas de produção até então conhecidas. Assim o mundo foi se transformando até chegarmos na forma que o conhecemos. Dentre os processos que foram se desenvolvendo, um deles foi a empregabilidade do alumínio nos métodos de fabricação, embalagens e produtos buscando redução de preço, peso, estrutural ou até mesmo por fator estético.

Segundo a Abal (Associação Brasileira do Alumínio) o consumo de alumínio aumentou em 10% no último ano (2018) com relação a 2017. Outro fator importante sobre o alumínio é a questão da reciclabilidade do mesmo, sendo que no Brasil a maioria do alumínio (51,6%) provêm de fonte reciclada, sendo o segundo país que mais recicla o mesmo, perdendo apenas para o Reino Unido, a imagem a seguir demonstra a relação de reciclagem do alumínio pelo mundo.

Figura 1 - Fonte de alumínio primária de Alumínio por país.



Fonte: ABAL (2019)

Em busca de um mundo cada vez mais sustentável é necessário o desenvolvimento de técnicas e processos de trabalho com o alumínio reciclado que permita um melhor aproveitamento do mesmo ou da energia que é utilizada diretamente e indiretamente em seus meios de produção, assim sendo, a conformação mecânica vêm progredindo se e atualizando com o passar do anos. Dentre os processos de conformação há a tixoconformação na qual consiste de um

processo extremamente refinado que necessita de uma tecnologia quando comparada com outros tipos de conformação por conta de sua necessidade de manter o material em fase semi-sólida para efetuar o processamento da liga metálica na conformação.

O processo de tixoconformação ou termoformagem, é um processo de fabricação mecânica em que utiliza um metal no estado semissólido, onde segundo Batalha (2003): “A temperatura é escolhida em geral para uma proporção de 60% de fase sólida e 40% de fase líquida”. Ao atingir a temperatura esperada, o metal é pressionado em uma matriz, obtendo formas complexas apenas com o uso do processo de conformação.

Sendo que Batalha (2003) cita como as principais vantagens do processo o curto tempo para finalização do item, possibilidade de confeccionar peças com geometrias complexas, menor porosidade e segregação já que o estado semissólido favorece a difusão e solubilidade. Contudo o processo apresenta algumas desvantagens, como o tempo de maleabilidade do metal ser curto, custos elevados e o processo restritos apenas a algumas ligas.

Por conta da reciclabilidade do alumínio, capacidade de manter-se no estado semissólido. Este trabalho busca estudar o comportamento da liga de alumínio A380 com variação de refinadores e modificadores, e assim analisar a viabilidade da tixoconformação em algumas ligas de alumínio, determinando as características do mesmo após sofrer o processo de conformação.

1.1 OBJETIVO GERAL

Observar e analisar as variações da microestrutura e microdureza da liga A.380 após ser tixoconformada. Variando a proporção de modificadores e refinadores.

1.2 OBJETIVO ESPECIFICO

O objetivo específico deste trabalho pode ser demonstrado pelos seguintes itens:

- Observar a variação no formato do grão após ser tixoconformada com diferentes composições de refinador e modificador.
- Avaliar a microdureza das amostras tixoconformadas.
- Observar o comportamento das amostras tixoconformadas no ensaio de tração.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, serão abordados os conceitos teóricos para melhor compreensão do trabalho, apresentando os temas: semissólidos, tixoconformação ligas de alumínio, refinadores de grão, liga de alumínio A380, ensaio de tração, microscopia e microdureza.

2.1 SEMISSÓLIDOS

O Estado semissólido consiste na utilização de materiais que são trabalhados a temperaturas relativamente elevadas, sendo possível que o material esteja tanto na fase sólida quanto na fase líquida durante o processo.

Sendo que o objetivo principal é a mudança morfológica da microestrutura do material, no qual a estrutura dendrítica é transformada em globular ou tixotrópica. Para isso existem dois caminhos para obtenção da mesma pela solidificação parcial (partindo do estado líquido) e pela refusão parcial (partindo do estado sólido).

Sendo que a característica final do material semissólido está ligada diretamente com a velocidade e condições de refinamento, e a temperatura e tempo que o material irá permanecer no estado semissólido (Nogueira 2014).

Assim o procedimento para realizar e trabalhar com o material no formato de semissólidos segue algumas etapas, a formação de peças metálicas feita a partir do estado semissólido tem como característica o *near-net-shape*, assim tendo uma forma e dimensões próximas ao produto final esperado, sendo que a fase semissólida tem como resultado final uma microestrutura de caráter não dendrítico (KEARNEY; AVERY KEARNY & COMPANY; ROONY, 1990).

2.2 TIXOCONFORMAÇÃO

O processo de tixoconformação ou termoformagem, é uma técnica que tem como base utilizar-se o material no estado semissólido no processo de conformação (VIEIRA; FREITAS; FERRANTE, 2011).

Sendo que para realizar o processo é necessário que o material esteja com uma fração de 60% de fase sólida e os 40% restantes em fase líquida, essa estimativa é determinada por Batalha (2003).

Nesse processo, o material metálico é elevado a uma determinada temperatura até que o mesmo apresente uma forma parcial uma fração líquida e outra sólida, sendo que a temperatura para essa situação específica do material varia conforme a liga utilizada. O metal então é conformado com o uso de uma matriz, realizando assim a fabricação de peças produzidas pelo processo de tixoconformação.

Sendo que Atkson (2005) cita como as principais vantagens e desvantagens do processo de tixoconformação quando comparada com o processo de fundição em matriz.

2.2.1 Vantagens da Tixoconformação

i) Eficiência energética – Por não haver a necessidade do material permanecer no estado líquido por um longo período, isto diminui o consumo de energia.

ii) Alta produtividade - o processo possui um ciclo de produção similar ao processo de fundição por pressão, permitindo uma alta cadência de produção.

iii) Facilidade no preenchimento – Por conta do comportamento viscoso da liga, isto auxilia na ausência, aprisionamento de ar e na redução de porosidade ocasionada pela contração. Permitindo assim o uso da tecnologia na produção de

peças de alta integridade, além de processos permitir que as peças confeccionadas possam ser tratadas termicamente posteriormente.

iv) Baixa temperatura no processamento – Por conta da temperatura necessária para o processo ser relativamente menor que a de fundição, isto reduz o choque térmico sobre a matriz, promovendo um aumento da vida útil da mesma, assim, permitindo o uso de materiais não tradicionais na confecção, além disso, permite-se realizar o processo em ligas com alto ponto de fusão.

v) Confecção de matrizes de forma mais simples – por conta das matrizes trabalharem em temperaturas menores, é possível fabricá-las utilizando de uma rápida prototipagem.

vi) Formação da microestrutura – apresentam características uniformes, possibilitando assim, aumento das propriedades mecânicas do material

vii) Redução de defeitos – Por conta da forma que ocorre o processo, o mesmo apresenta uma redução de trincas no processo de solidificação e de porosidade.

viii) Acabamento superficial de boa qualidade.

2.2.2 Desvantagens da Tixotomografia

i) Custo elevado da matéria prima – este fator se dá pelo fato de haver poucos fornecedores e ao complexo processo para se obter a liga de materiais que permitam o processo de semi-sólidos.

ii) Pouco conhecimento do processo – Por conta de ser um processo recente, ainda pouco se sabe sobre os mecanismos e variáveis que influenciam o procedimento, aumentando assim o valor para desenvolver o ferramental.

iii) Exigência de mão de obra especializada – necessita de profissionais com alto nível de habilidades e conhecimento quando comparada com os processos mais tradicionais.

iv) Controle de temperatura - Por conta da viscosidade e a fração semissólida serem dependentes da temperatura as ligas que possuem uma pequena faixa no qual permanecem sob o estado semissólido necessitam de um controle sofisticado de aquecimento, além de equipamentos de alta tecnologia.

2.3 LIGA DE ALUMINIO

O alumínio é caracterizado por sua leveza em relação aos demais materiais metálicos, resistente a corrosão, alta condutividade térmica e elétrica. Sendo que, segundo Lourençato (2008), as ligas de alumínio Al-Si são extremamente utilizadas na indústria em vários processos de fabricação e tem a capacidade de realizar o processo de tixoconformação.

A adição de silício tem o objetivo dar alta fluidez no metal líquido, para assim melhorar a alimentação no molde, diminuindo a contração e aumento a resistência no surgimento de trincas. Sendo que o sistema de fase do Al-Si é eutético binário, no qual a solubilidade do alumínio no silício e do silício no alumínio é limitada, sendo que o silício possui a capacidade de solubilidade de 1.5 at.% na temperatura eutética. Markhlouf (2001).

2.4 REFINADORES DE ALUMINIO

Os refinadores de grão, são elementos que quando introduzidos na liga provocam uma modificação na morfologia do material.

As ligas de alumínio hipoeutéticas de Al-Si apresentam uma ampla fração primária de α -Al, assim tornando possível realizar o refinamento da microestrutura no qual reduzem o tamanho dos grãos do material, e assim melhorando sua macroestrutura (Kori, 2000).

Com a utilização de Al-5wt%Ti-1wt%B como liga refinadora, é possível obter grãos equiaxiais com o tamanho de grão que variando entre 100 a 150 μm em um lingote de alumínio (Kashyap, 2001, McCartney, 1989).

Por fim, a redução do tamanho do grão tem sido assunto de grande interesse entre os pesquisadores da área de fundição, por conta da melhora das propriedades de mecânicas dos materiais (Lourençato, 2008).

Inicialmente, no refinamento de grãos, são introduzidas em grande quantidade núcleos de nucleação heterogênia dentro do metal, posteriormente algumas condições concebidas no aquecimento ou fluxo de metal, forçando e favorecendo a ativação do maior número dos núcleos e assim nuclear o sólido. Contudo o crescimento e a nucleação devem ser realizados de forma controlada, para que os núcleos formados não cresçam de forma exacerbada e consumam os demais grãos, e assim não auxiliando na nucleação desejável de novos grãos (MacCartney, 1989).

Segundo Lourençato (2008), para se obter o material com microestrutura globular ou tixotrópica no estado semi-sólido, deve ocorrer a solidificação parcial ou fusão parcial do material. E assim procurar obter microestruturas com finas partículas na fase primária (< a 100 μm de diâmetro) e morfologia esférica.

2.5 ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração é um típico ensaio mecânico extremamente utilizado para determinar algumas características do material, no qual um corpo de prova preestabelecido é confeccionado e ensaiado conforme a norma utilizada.

O ensaio de tração permite obter valores numéricos da resistência a tração do material, assim possibilitando a análise das possíveis aplicações, a figura 2 demonstra os equipamentos utilizados para realizar o ensaio que é composto usualmente por uma máquina de ensaio com garras cambiáveis, extensômetro e

uma fonte para receber os dados, que pode ser um computador ou nas máquinas mais recentes um tablet ou até mesmo armazenagem diretamente na forma Cloud (Núvem).

Figura 2- Equipamentos utilizados para ensaio de tração.

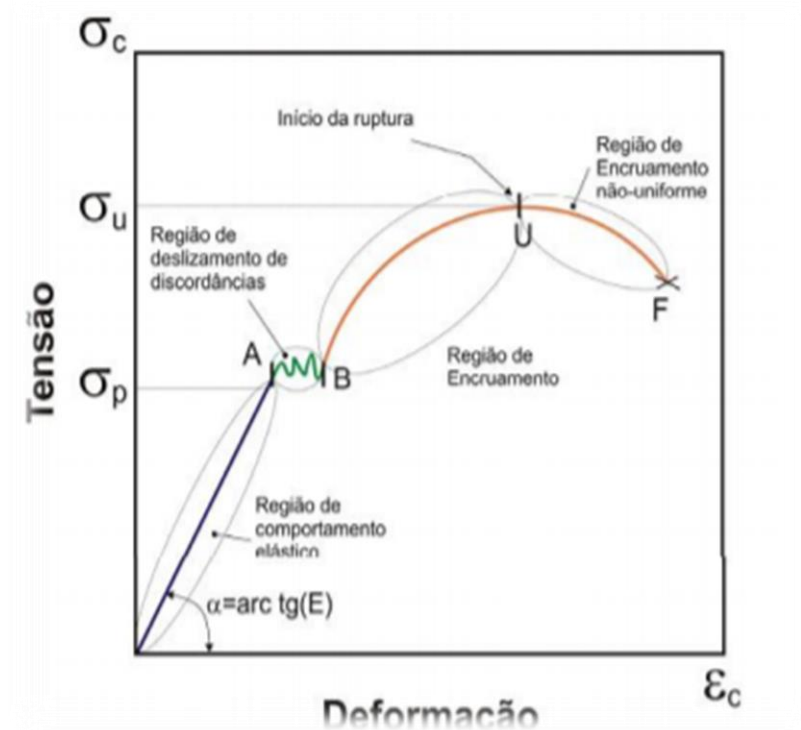


Fonte: Autoria própria

Segundo Dalcin (2007) o ensaio de tração pode demonstrar o comportamento dos mais diversos materiais, gerando dados de extrema importância quando se vai realizar um projeto, permitindo testar e explorar os mais diversos materiais, bem como determinar se o material ensaiado possui as propriedades mínimas para ser utilizado no projeto.

As informações podem ser extraídas de forma direta ou indireta, como por exemplo: região de comportamento elástico, região de deslizamento de discordâncias, região de encruamento, início de ruptura e região de encruamento não-uniforme. A figura 3 demonstra como as propriedades do material citadas acima são apresentados no gráfico de tensão por deformação.

Figura 3 - Gráfico exemplo de Tensão x Deformação



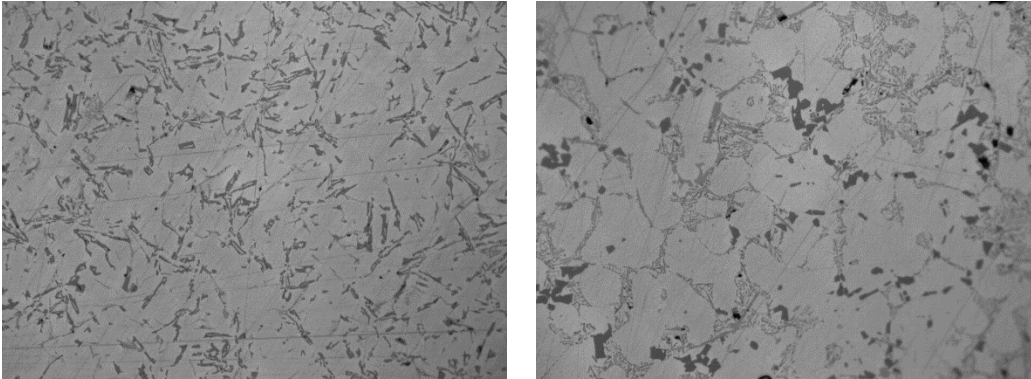
Fonte Dalcin (2007)

2.6 MICROSCOPIA

A metalografia é um estudo da estrutura morfológica dos materiais, na qual consiste no uso de um microscópio (óptico, eletrônico, varredura, ..) para o estudo da microestrutura. Segundo Callister (2002), o estudo do contraste na imagem produzida no estudo do material metálico é denominado metalografia.

Contudo para a realização dessa técnica é necessário seguir alguns estágios como ter uma superfície plana e espelhada para realizar os procedimentos, assim sendo necessário lixar e polir a superfície até que consiga uma aparência espelhada e em alguns casos realizar um ataque químico no qual um reagente químico realiza a oxidação em determinadas posições da estrutura microscópica a ponto de facilitar a observação em um microscópio óptico (BAPTÍSTA; SOARES; NASCIMENTO, 1998). A figura 4 exemplifica o resultado obtido na metalografia.

Figura 4 - Exemplo de imagens obtidas por metalografia



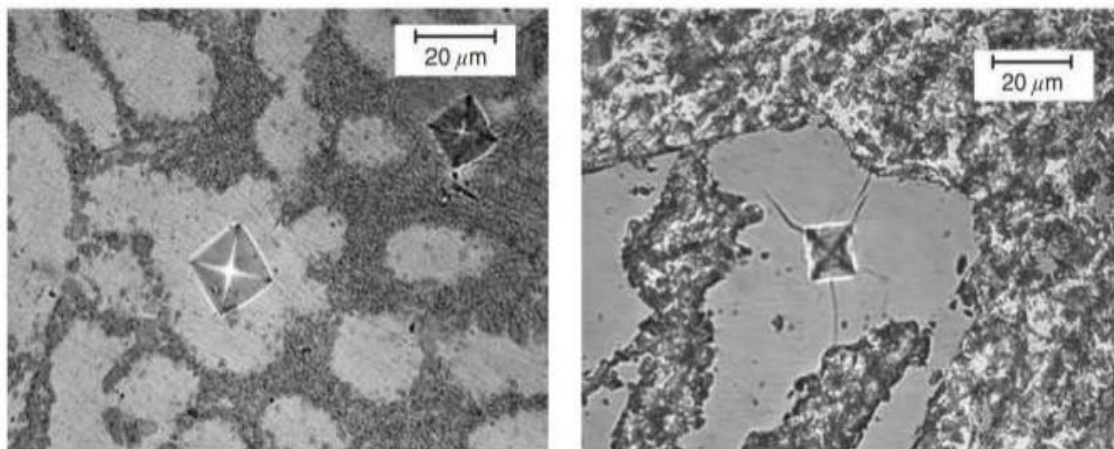
Fonte: Autoria própria

2.7 MICRODUREZA

A Microdureza, consiste em um ensaio que determinar a dureza de materiais em áreas pequenas e de forma específica, sendo que “[...] O ensaio de microdureza produz uma impressão microscópica e se utiliza de penetradores de diamante e cargas menores que 9,8 N (1 kgf). Os métodos mais utilizados são a microdureza Vickers e a microdureza Knoop (ASTM E384:2008)” Garcia (2012, p. 142). Por conta do tamanho do ponteiro a microdureza permite obter valores de fases do material quando é o caso (por exemplo, os metais que apresentam fases diferentes entre si).

Contudo para realizar o procedimento, é necessário algumas etapas serem seguidas, como a necessidade de uma superfície paralela, e um processo de lixamento e polimento até conseguir uma superfície espelhada para quando realizar o processo, a edentação consiga ser visualizada no no microdurômetro que utiliza um conjunto de lentes para realizar a leitura do tamanho da edentação e assim calcular a microdureza. A figura 5 demonstra o a as impressões bem como o formato obtido após a penetração da ponteira em uma peça metálica.

Figura 5 - Impressões realizadas pelo método de microdureza Vickers em ligas Al-Si fundidas.

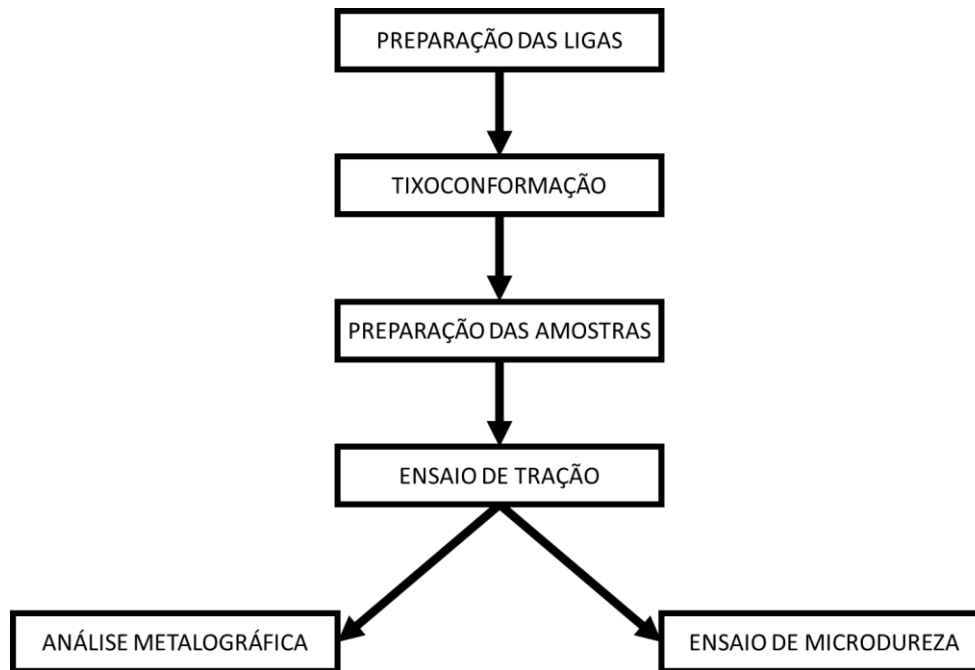


Fonte: (Garcia, 2012)

3 METODOLOGIA

Nesse capítulo será apresentada a fase experimental que foi realizada para atender os objetivos propostos. A figura 6 demonstra de forma simplificada todos os passos realizados no experimento.

Figura 6 - Fluxograma dos procedimentos.



Fonte: Autoria própria

A liga de alumínio base utilizada foi a A380, a qual foi obtida em lingotes de forma comercial, que por sua vez é proveniente de reciclagem. Os lingotes foram cortados com uma serra fita em segmentos de 2 polegadas de comprimento, de modo a facilitar o processo de fracionamento do material e fusão do mesmo. Utilizando-se de uma guilhotina pneumática, tanto o refinador quanto o modificador, foram cortados em pequenos pedaços com aproximadamente 5 milímetros de comprimento.

Para cada processo de fundição foi estipulado utilizar dois quilos de alumínio, junto de 0,2% da liga refinadora composta por titânio (Ti) e boro (B). Esta liga refinadora foi inserida por meio de uma liga comercial (5Ti1B) com a seguinte composição 94wt%Al-5wt%Ti-1wt%B. Além da liga refinadora, as amostras (C e D) receberam o agente modificante Estrôncio (Sr), o qual foi incorporado ao processo utilizando-se uma liga comercial com a seguinte composição 90wt%Al-10wt%Sr.

Para efeito de comparação, foi preparada uma liga (A) sem adição do refinador e agente modificante (Sr). A tabela 1 demonstra a composição das ligas processadas.

Tabela 1 - Processo esperado na composição das ligas a serem fundidas.

Vazamentos	A380 (kg)	Refinador	Modificador
A	2,000	0	0
B	2,000	0,2%	0
C	2,000	0,2%	200 ppm
D	2,000	0,2%	600 ppm

Fonte: Autoria própria

Com o auxílio de uma balança de precisão, as parcelas mássicas esperadas foram separadas e preparadas conforme os valores de proporção pré-determinado para o processo de fundição, resultando assim nos valores em gramas dos itens nos quais são ilustrados na tabela 2, sendo que as massas obtidas representam a quantidade de material para manter a liga fundida na mesma proporção das ligas pré-estabelecidas na tabela 1.

Tabela 2 - Massa de cada elemento utilizado na fusão de cada liga

Vazamentos	A380 (kg)	Refinador- TiBAI (g)	Modificador Estrôncio (g)
A	2,138	0	0
B	2,180	91	0
C	2,118	89	5
D	2,123	89	14

Fonte: Autoria própria

Inicialmente os moldes metálicos foram borrifados com desmoldante comercial SEPAROL 94 e encaminhados para a estufa de secagem, na qual permaneceram durante 10 minutos. Posteriormente os mesmos foram posicionados para facilitar o processo de vazamento.

Os materiais foram dispostos dentro do forno de fusão por indução de 35 kW de potência da marca GRION, do laboratório de conformação da UTFPR Campus Ponta Grossa. Cada vazamento gerou 4 amostras, sendo a A uma amostra do alumínio sem refinador, a B apenas com refinador, a C com 200 ppm de estrôncio

mais refinador e a D com 600 ppm de Estrôncio (Sr) mais refinador. A figura 7 demonstra o processo de vazamento.

Figura 7 - Processo de fundição das ligas de alumínio com variação de modificador e refinador.



Fonte: Autoria própria

Posteriormente ao vazamento, foi aguardado um certo período de tempo para que tanto os moldes quanto os lingotes alumínio esfriassem, procedendo posteriormente a remoção dos lingotes dos moldes. Os lingotes então permaneceram em contato com ar até que atingissem a temperatura ambiente.

Em seguida os lingotes fabricados tiveram uma parcela de 20mm tanto da extremidade superior quanto da inferior removidos, de modo a eliminar os rechupes criados pela solidificação do alumínio na parte superior e imperfeições na base.

Posteriormente, o diâmetro cônico dos lingotes foram usinados em dimensões cilíndricas para se adequar as dimensões de operação da matriz de tixoconformação do laboratório de conformação da UTFPR – PG. Por fim, no processo de torneamento foi utilizado uma pastilha triangular convencional de metal duro, de modo a reduzir as dimensões dos lingotes brutos para os valores de 147 mm de comprimento e 27,5 mm de diâmetro. Como pode ser visto na figura 8.

Figura 8 – Usinagem dos tarugos para o processo de tixoconformação.



Fonte: Autoria própria

Utilizando uma broca de aço rápido de 2mm de diâmetro foi realizado um furo central na face do lingote para permitir a inserção de um termopar para controle da temperatura de aquecimento ao decorrer da tixoconformação. Ambos processos de usinagem ocorreram no laboratório de usinagem da UTFPR – PG.

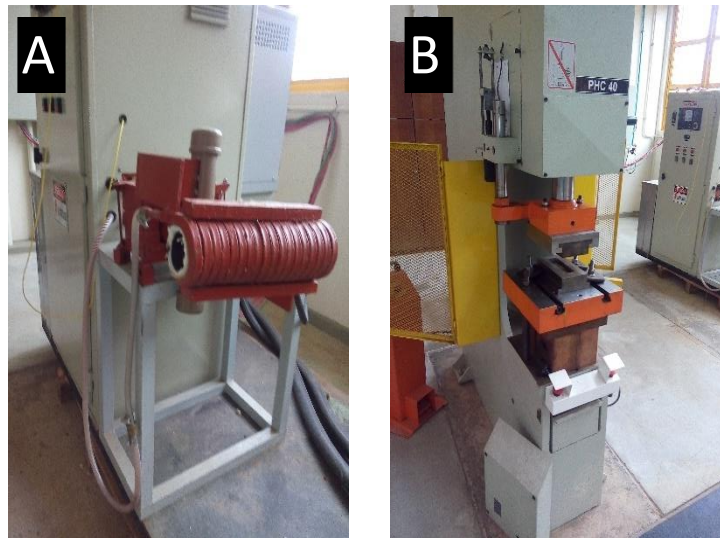
Após finalizar o processo de usinagem, houve a necessidade da preparação e adequação dos equipamentos do laboratório de conformação, sendo assim, foi necessário reconfigurar o sistema de indução, no qual foi acoplado uma bobina de indução para aquecimento dos lingotes até a fração semissólida desejada, além de que, foi instalada e fixada a matriz de conformação na prensa hidráulica com capacidade de 40 toneladas.

Sequentemente foi realizado o procedimento de aferição e distribuição de homogeneidade da temperatura sobre a peça. Assim, preparou-se um tarugo especial para verificar a distribuição de temperatura ao longo da bobina de indução, sendo que a temperatura foi aferida em três regiões distintas do tarugo especial. Para isso foram inserido três termopares em regiões distintas, sendo um em cada extremidade e um na região central. A peça foi aquecida utilizando 15% da potência da bobina de indução até atingir a temperatura de 400°C, após essa temperatura a potência do forno foi reduzida para 11% para diminuir a taxa de aquecimento sobre a peça e assim garantir uma maior difusividade térmica sobre a mesma. Esse processo foi mantido até o tarugo chegar a 562°C, que é o ponto onde o mesmo

encontra-se no estado de semissólido com 60% de fração sólida, conforme estabelecido por Ferreira (2017).

Após a validação da homogeneidade térmica para o método de aquecimento empregado na citação acima, os tarugos sofreram o processo de tixoconformação, na qual consiste em aquecer a peça até sua fração semissólida e posteriormente conformá-la em uma matriz. O procedimento foi realizado três vezes para cada tipo de liga com tempos de tratamento distintos. A figura 9 demonstra os equipamentos utilizados para o processo de tixoconformação, sendo A o forno a indução e B a prensa hidráulica.

Figura 9 - Equipamentos Utilizados para realizar a Tixoconformação (A – Forno a indução / B – Prensa hidráulica).



Fonte: Autoria própria

Com base aos processos de tixonconformação, foram adotados os tempos de globularização na qual o material permanece sobre o estado de semissólido, foi escolhido os tempos de 0(s), 30(s) e 90(s).

Resultando assim em três amostras diferentes por cada tipo de liga produzida. Sendo que a nomenclatura utilizada foi a seguinte: X1(0s – Os que antigiram a temperatura de semissólido e em seguida foram tixoconformados), X2 após atingir a temperatura de semissólido a mesma continuou no forno de indução por mais 30 segundos visando realizar a globulação e X3 ao atingir a temperatura de semissólido, foi mantida a esta temperatura dentro da bobina por 90 segundos, visando realizar a globulação. Sendo que “X” representa o valor de uma das ligas que foram fabricadas, exemplo: A1, B3, C2, D1.

Lembrando que a liga A é caracterizada pelo alumínio comercial A380, a liga B pelo A380 com adição de 2% de titânio, a liga C pelo A380 com 2% de titânio e 200ppm de estrôncio e por fim a D com 2% de titânio e 600 PPM de estrôncio.

Conforme o procedimento descrito foi possível obter as amostras de ligas tixoconformadas, como pode-se observar na figura 10.

Figura 10 - Amostras resultantes do processo de tixoconformação com variação de tempo na fase semisólida.



Fonte: Autoria própria

A tabela 3 apresenta a relação das amostras geradas pelo processo de tixoconformação, apresentando os as nomenclaturas utilizadas, o tempo que as mesmas foram mantidas no estado de semissólido para a realização da globularização e por fim os elementos inseridos na liga durante o processo de fundição (Titânio e Estrôncio).

Tabela 3 - Amostras de tixoconformação.

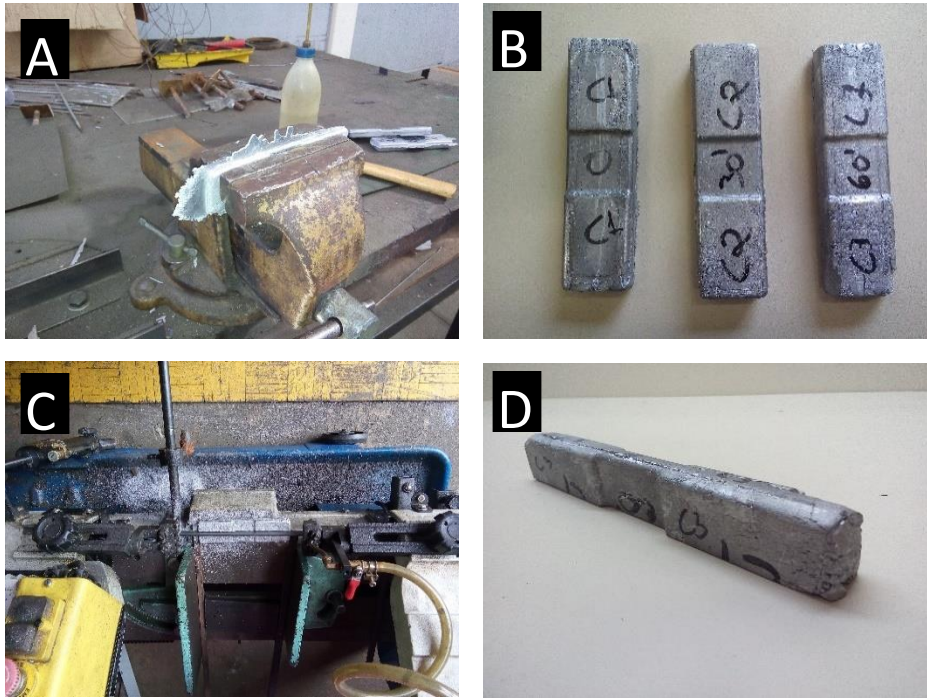
Amostras de Tixoconformação			
Amostra	Tempo de globularização	Refinador (Titânio)	Modificador (Estrôncio)
A1	0s	0%	0ppm
A2	30s	0%	0ppm
A3	90s	0%	0ppm
B1	0s	2%	0ppm
B2	30s	2%	0ppm
B3	90s	2%	0ppm
C1	0s	2%	200ppm
C2	30s	2%	200ppm
C3	90s	2%	200ppm
D1	0s	2%	600ppm
D2	30s	2%	600ppm
D3	90s	2%	600ppm

Fonte: Autoria própria

Após efetuar o processo de tixoconformação, as amostras foram fixadas em uma morsa para e com o auxílio de um martelo e uma talhadeira, foi realizado o acabamento superficial com remoção das rebarbas da superfície do sobremetal, com o intuito de remover o material excedente do processo de tixoconformação.

Posteriormente a rebarba formada foi removida e com os corpos de prova já limpos, os mesmos foram encaminhados para a serra fita hidráulica, na qual foram contados cortados ao meio, com o intuito de produzir peças simétricas e proporcionais entre sí. O corte como o procedimento de remoção do sobremetal foi realizado no laboratório de usinagem da UTFPR-PG. Com o desenvolver desse processo, cada peça inicial forneceu dois corpos de prova de cada liga desenvolvida. As etapas descritas acima pode ser observado na figura 11, que representa de forma simplificada o procedimento.

Figura 11 - Etapas de preparação pra usinagem (A - limpeza do sobremetal / B - Amostras limpas / C - Processo de corte / D - Amostra pronta para o processo de torneamento).



Fonte: Autoria própria

Posteriormente, a castanha do torno foi removida e em seu lugar foi acoplado uma castanha de quatro pontos de apoio para conseguir fixar as peças que apresentavam quatro faces, sendo que cada face possuía aproximadamente um ângulo de 90° com as vizinhas. Com o uso de uma pastilha triangular convencional de aço duro as mesmas foram usinadas até que se tornarem-se em sua extremidade objetos cilíndricos.

Sequentemente, foram encaminhadas para o torno CNC para realizarem a etapa final de preparação da usinagem, na qual se consistia em de corpos de prova em formato cilíndricos para o ensaio de tração segundo a norma ASRM E8/E8M – 09. Sendo que o tipo do corpo de prova que foi confeccionado seguia o padrão, sem roscas e com o diâmetro útil de tração de 6 mm. A figura 12 demonstra as fases e preparação dos corpos de prova ao serem submetidos aos processos de torneamento convencional e torneamento em CNC.

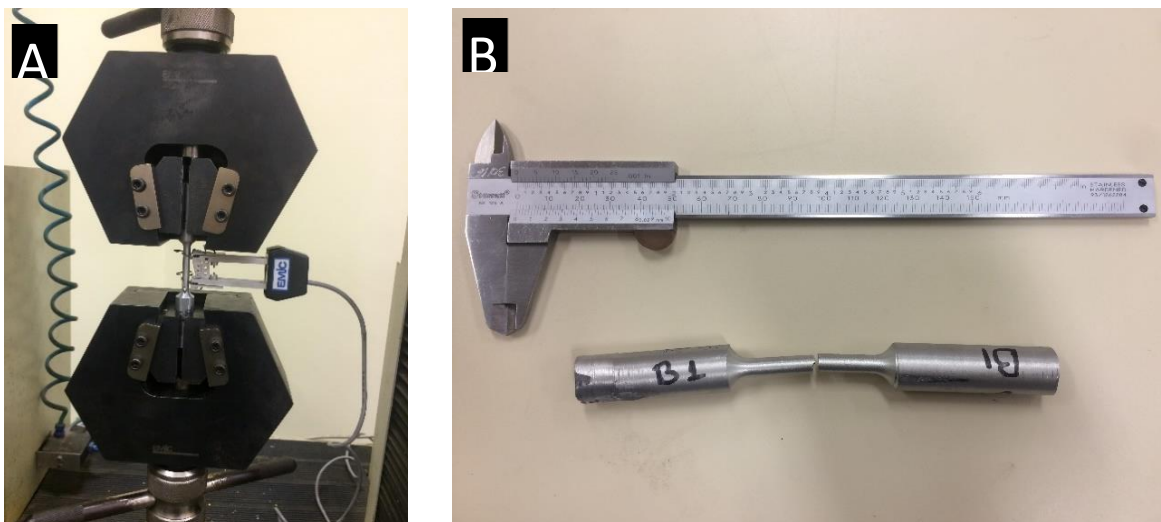
Figura 12 - Processo de Usinagem (A - Amostra pré usinagem / B - Peça que sofreu usinagem com torno convencional com castanha de 4 pontos / C - Peças usinada com torno CNC).



Fonte: Autoria própria

Com os corpos de prova devidamente fabricados, foi realizado o ensaio de tração para cada condição, onde as amostras foram fixadas nas garras do equipamento pertencente ao laboratório de ensaios da UTFPR – PG, juntamente com o extensômetro. A figura 13 mostra o processo do ensaio de tração.

Figura 13- Procedimento de ensaio de tração (a)– Posicionamento do ensaio de Tração (b) – Amostra pós ensaio de tração.

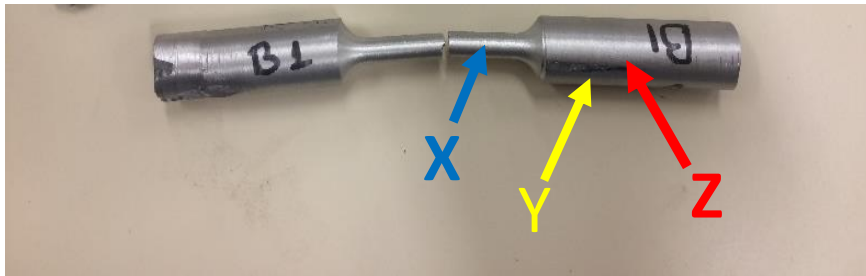


Fonte: Autoria própria

Utilizando o software, os dados coletados pelo ensaio foram tratados para a criação dos gráficos de tensão versus deformação, que serão apresentados no capítulo de resultados.

Posteriormente ao ensaio de tração, os corpos de prova foram encaminhados para o laboratório de preparação metalográfica, no qual foram cortados em duas posições distintas, sendo que duas amostras foram tiradas da região de maior diâmetro e uma na região de menor diâmetro do corpo de prova, gerando assim três amostras por corpo de prova, como pode ser observado na figura 14.

Figura 14 – Regiões onde foram extraídos as amostras (X - area tracionada (amostra de microdureza) / Y - area não tracionada (amostra de microdureza)/ Z - amostra para metalografia).

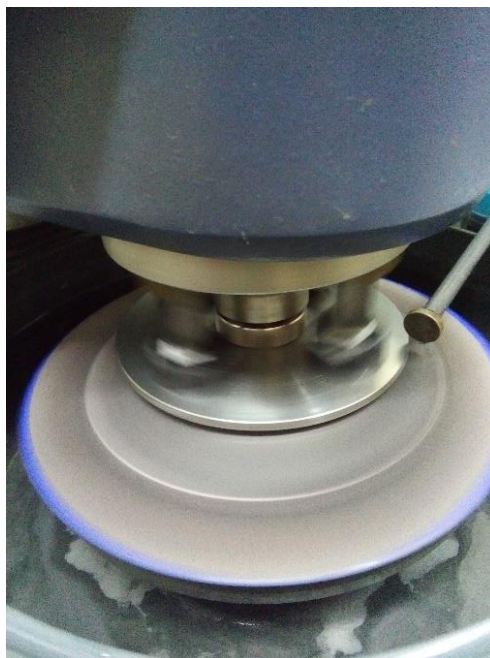


Fonte: Autoria própria

Após os cortes, as porções dos corpos de prova foram preparadas para os ensaios de metalografia. Inicialmente as amostras foram embutidas a quente utilizando como base moldes de baquelite, esse processo ocorreu a uma temperatura aproximada de 180°C e com uma pressão de 42000psi, na qual foi inserido pressão no sistema até que o mesmo atinge-se o regime permanente e a pressão se mantivesse constante. Após o equilíbrio, as condições de temperatura e pressão foram mantidas por 5min nas condições pré-estabelecidas, sendo utilizado nesse processo uma embutidora BUEHLER SimpliMet XPS1.

Sequentemente ao embutimento as amostras foram submetidas ao processo de preparação de superfície, na qual os corpos de prova sofreram o processo de lixamento em lixadeiras manuais com o uso de lixas com os seguintes mesh - 320, 600 e 1200, e polimento em suspensão de diamante de 3 e 1 μm . Por fim, foi realizado o um polimento mais fino com sílica coloidal de 0,04 μm com uma politriz automática. Todas as etapas que descritas nesse paragrafo ocorreram no laboratório de preparação metalográfica da UTFPR – PG. A figura 15 demonstra o processo de polimento automático.

Figura 15 - Processo de polimento.



Fonte: Autoria própria

Após ao polimento, as amostras foram limpas inicialmente com água corrente, posteriormente com álcool 95% e rapidamente secadas com ar quente. Uma parcela das amostras foram atacadas com ácido clorídrico e sequentemente analisadas no microscópio, gerando assim as micrografias. A figura 16 demonstra um momento do processo descrito acima.

Figura 16 – Microscópio óptico durante a realização dos ensaios.



Fonte: Autoria própria

Assim foi gerado as imagens da metalografia de cada elemento, foi realizado uma análise metalográfica sobre as imagens, buscando determinar a morfologia do material.

A outra parcela dos corpos de prova foram encaminhadas para o ensaio de microdureza, na qual sofreram os mesmos processos da metalografia, contudo não houve ataque químico e as amostras apenas foram polidas com partículas de diamante em suspensão de 3 μm . No ensaio de microdureza do material, sendo que foi realizado 12 medições por corpo de prova, no qual os dois maiores valores bem como os dois menores foram descartados, retornando assim apenas 8 valores efetivos de medição. A figura 17 demonstra o microdurômetro durante a realização do ensaio de microdureza.

Figura 17 - Microdurômetro durante a realização do ensaio.



Fonte: Aatoria própria

Por fim, os dados da microdureza foram compilados e tratados com o uso do software Excel®, gerando assim os dados e a dispersão da microdureza em relação a cada material e região estudada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

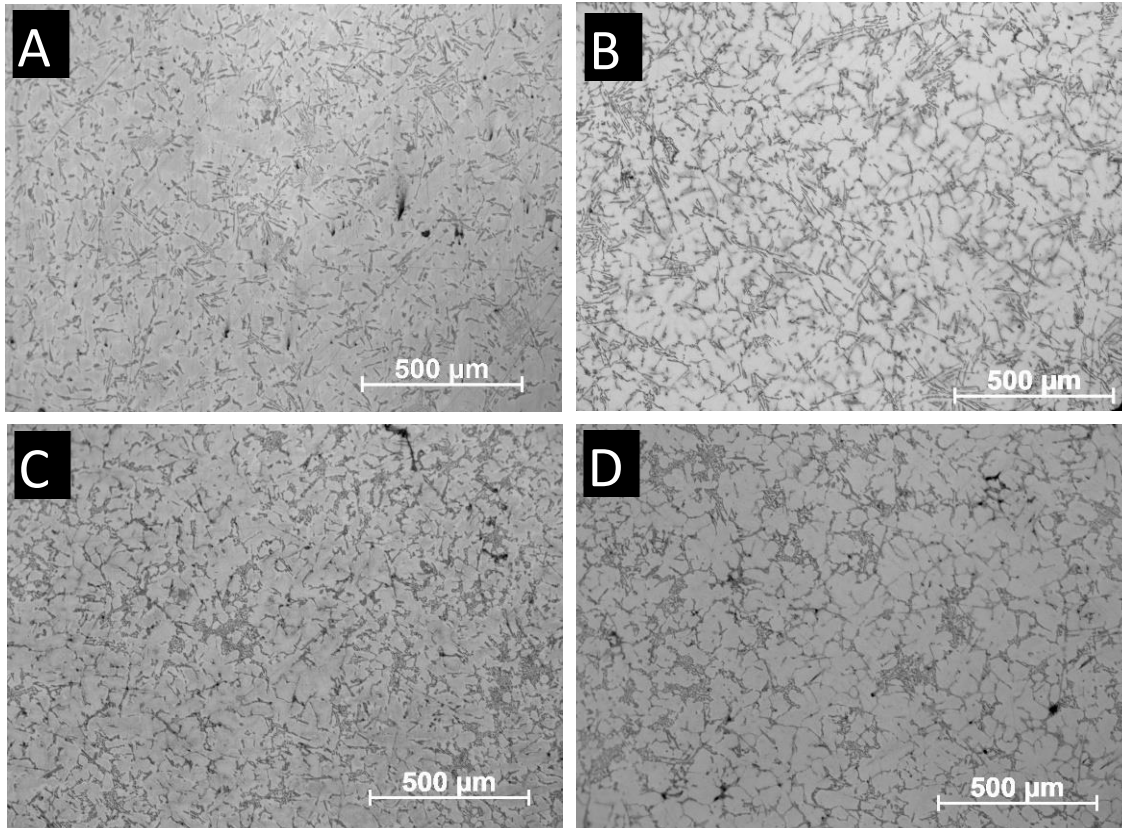
Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos. Se apresentam três epígrafes, sendo o primeiro dedicado à análises microestrutural, apresentando-se a morfologia e microestrutura das ligas produzidas e globularizadas, o segundo dedicado aos resultados do ensaio de tração no qual é responsável para indicar os valores de tensão e deformação da liga com relação ao tempo de processamento no tratamento de globularização, e por fim o terceiro epígrafe os dados das análises de microdureza.

4.1 RESULTADOS DAS ANALISES MICROESTRUTURAL

Com o objetivo de observar a morfologia e as características microestruturais da liga A380 nas condições experimentais deste trabalho, foram realizadas as análises metalográficas após os ensaios de tração, permitindo assim observar os aspectos da microestrutura de cada amostra. Os resultados obtidos são referentes a liga de alumínio A380 com a presença de refinador e/ou modificador.

Na figura 18, é possível verificar que a microestrutura da liga de alumínio comercial A380 apresenta uma morfologia dendrítica, composta por regiões mais claras da fase Al- α envoltas por uma série de estruturas aciculares de tons mais escuros (eutético Al-Si) e do intermetálico Fe- β (Figura 18A). Microestrutura semelhante foi encontrada para a mesma liga por Karamouz et al (2013). Observou-se ainda a presença de outro microconstituente formado com frequência próximo as estruturas do intermetálico Fe- β ou do Si eutético. Irizalp e Saklakoglu (2014) em seus estudos sobre a liga A380 identificaram um microconstituente com morfologia similar como sendo a fase intermetálica θ -Al/Cu.

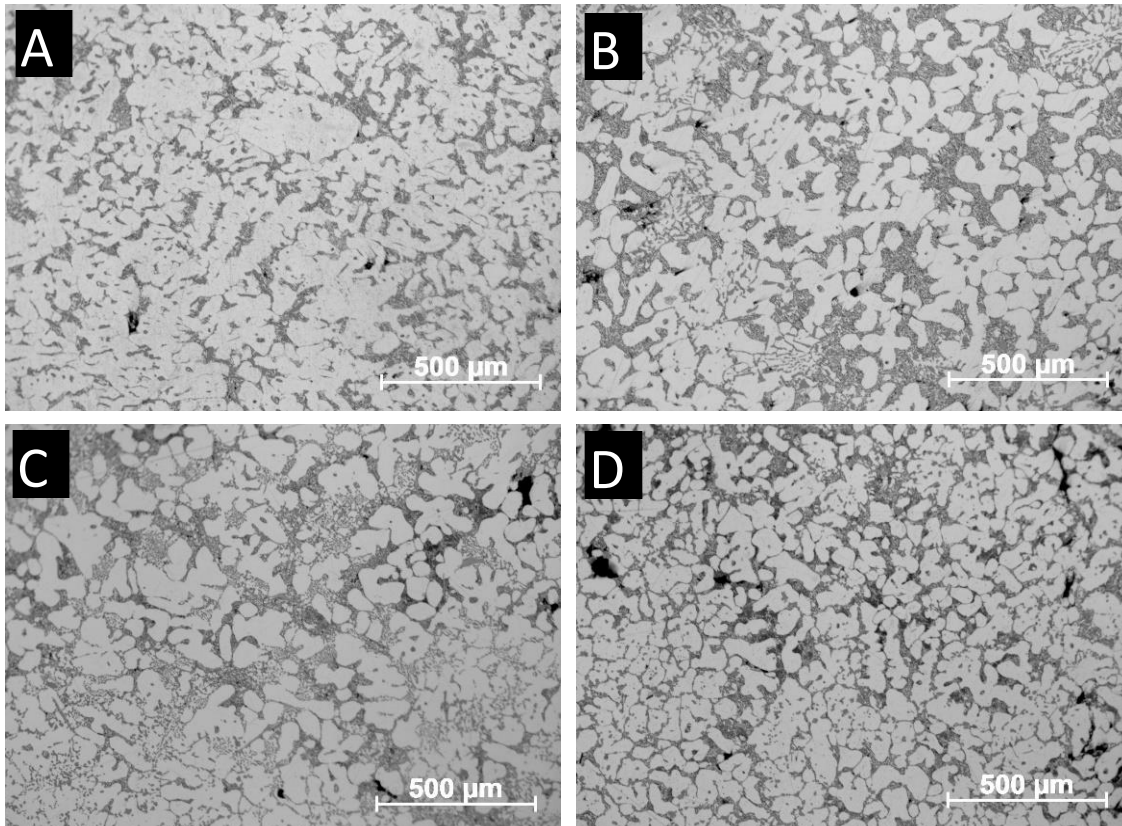
Figura 18 - Imagem da metalografia das ligas fundidas (A – A380 comercial / B – A380 + Refinador / C - A380 + refinador + 200ppm modificador / D - A380 + refinador + 600ppm modificador)



Fonte: Autoria própria

Quando foi usado o refinador na liga A380 (figura 18B), esta apresenta uma microestrutura com algumas variações na morfologia da liga, mostrando uma fase com aspecto de caráter menos dendríticas e mais refinada, indicando que ao inserir o titânio no processo de fundição há um favorecimento da mudança microestrutural do material. Nas amostras C e D é possível observar uma forma de grão semelhante a rosetas equiaxiais o que tudo indica que o Sr favorece o desenvolvimento de estruturas com o formato de rosetas quando combinado com ligas base de Al-Si, visto que foi encontrado um resultado semelhante por Ferreira (2017) ao realizar seus experimentos. Sendo que quanto maior a quantidade Sr nessa situação específica, mais visíveis tornam-se os grãos, bem como sua forma.

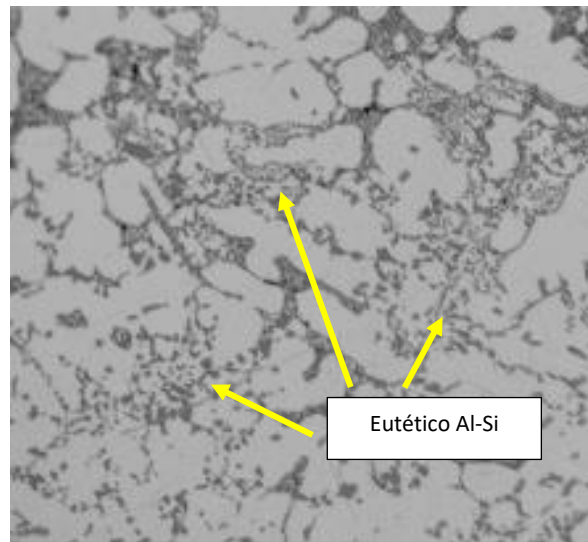
Figura 19 - Imagem da metalografia das ligas tixoconformadas (A – A380 comercial / B – A380 + Refinador / C - A380 + refinador + 200ppm modificador / D - A380 + refinador + 600ppm modificador.



Fonte: Autoria própria

Na figura 19, se observam as imagens das amostras que ao chegar à temperatura de semissólidos foram tixoconformadas, é possível constatar que nessa situação torna-se complexo a diferenciação das microestruturas quando comparada as amostras que possuem refinador e modificador. Pois não apresentam grande distinção de morfologia como as amostras que não foram tixoconformadas da figura 18 (A e B). Porém nessa situação, foi possível observar o surgimento de pontos que possivelmente são de estruturas eutéticas. Pois assemelha-se as estruturas encontradas por Ferreira (2017).

Figura 20 - Ampliação da amostra tipo C com 0 segundos de globularização.



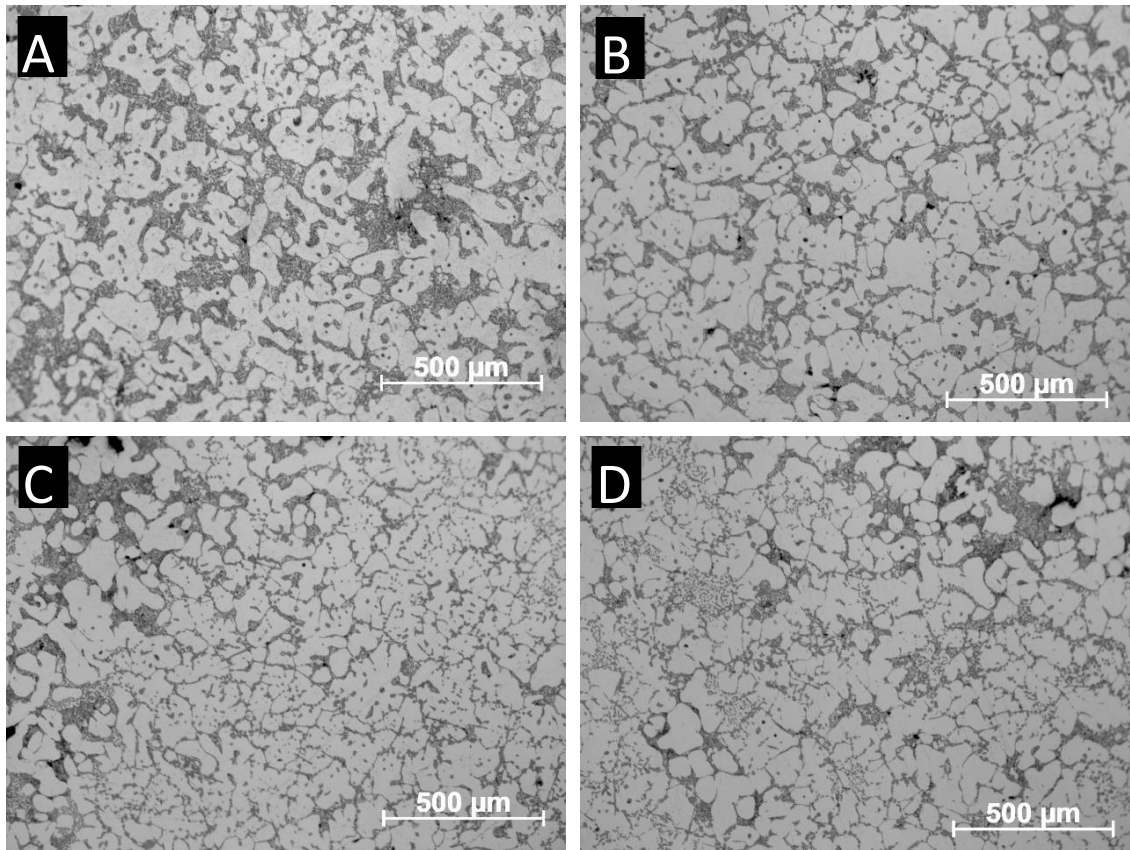
Fonte: Autoria própria

A figura 20 é a ampliação da metalografia da amostra C da figura 19, que possui 200 ppm de estrôncio, 2% de refinador e sofreu o processo de tixoconformação, nela é possível observar regiões com vários pontos escuros, esta fase também foi encontrada por Ferreira (2017), na qual acredita-se que se trata de regiões do eutético de Al-Si modificadas pela adição do estrôncio na microestrutura. Para Farahany et al., (2015) trata-se de uma região que apresenta uma estrutura tridimensional de caráter complexo e composto de uma morfologia fina tipo fibrosa.

Na situação da Figura 21 em que os corpos de provas permaneceram globularizando pelo período de 30 segundos é possível perceber que todas as amostras apresentaram uma estrutura de caráter globular, visto que permanecerem por um período superior no estado de semissólido, nas amostras B é possível observar um crescimento dos grãos quando comparado com a estrutura A que não possui refinador.

Outro ponto em questão é a amostra D, que possui uma concentração maior de fases eutéticas que a amostra C, uma hipótese provável é que pelo fato de a amostra D possuir três vezes mais estrôncio, isso favorece o surgimento das mesmas.

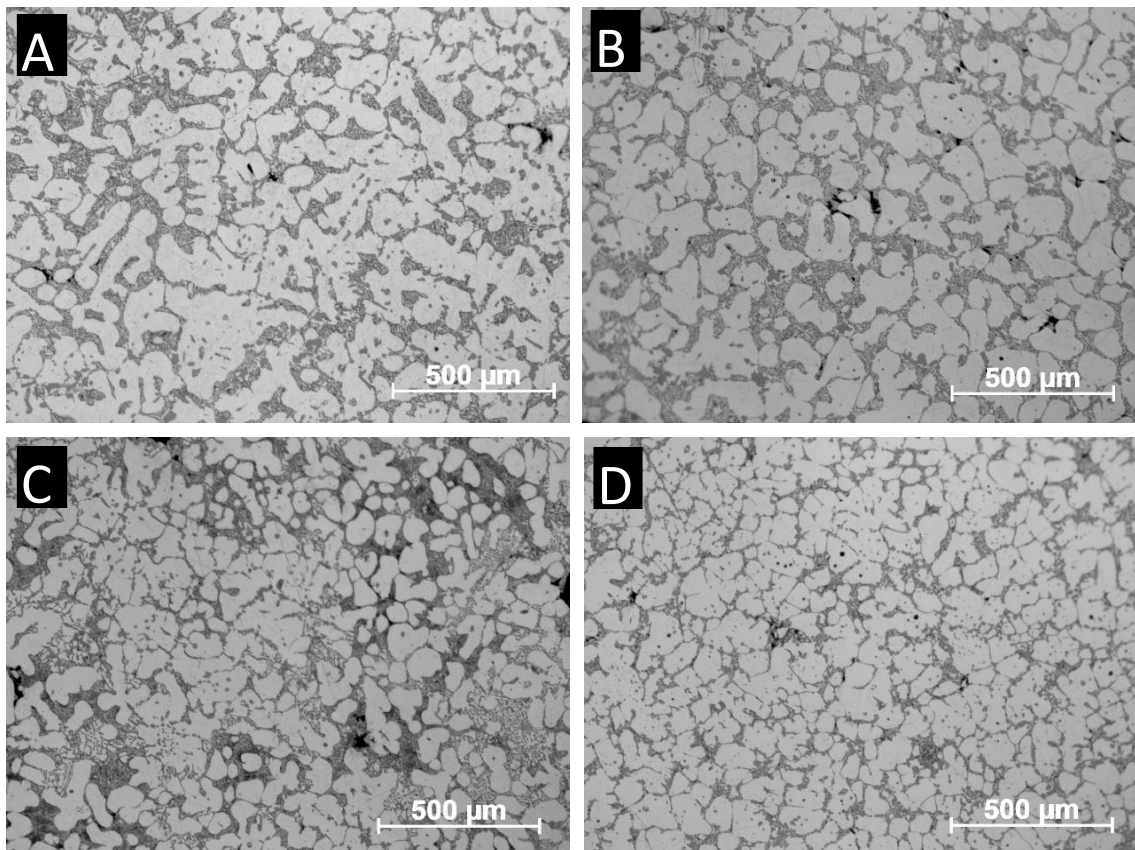
Figura 21 - Imagem da metalografia das ligas tixoconformadas e globularizadas por 30 segundos (A – A380 comercial / B – A380 + Refinador / C - A380 + refinador + 200ppm modificador / D - A380 + refinador + 600ppm modificador).



Fonte: Autoria própria

Na figura 22, se observa as microestruturas das amostras que mais permaneceram sobre o estado globularização (90 segundos), é possível perceber que o modificador favoreceu o surgimento de estruturas com caráter eutético, ao observar os resultados das amostras C e D é possível perceber uma quantidade maior de grãos e um formato próximo de rosetas, principalmente nas amostras D. Contudo o tamanho dos grãos diminuiu em relação a amostras A e B, o que indica que o estrôncio favorece o surgimento de vários pontos de nucleação distintos.

Figura 22 - Imagem da metalografia das ligas tixoconformadas e globularizadas por 90 segundos (A – A380 comercial / B – A380 + Refinador / C - A380 + refinador + 200ppm modificador / D - A380 + refinador + 600ppm modificador).



Fonte: Autoria própria

4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO

Assim como descrito na metodologia, foram realizados ensaios de tração nos corpos de prova, no qual foi possível obter valores de alongamento bem como da força de tração empregadas durante o ensaio.

Com esses dados foram confeccionados os gráficos de tensão por deformação da liga de Alumínio A380, nas condições experimentais, sendo aplicado adição de elementos modificadores (estroncio) e refinadores (titânio), além das variações no tempo de retenção no processo de tixoconformação.

Na imagem da figura 23, é possível observar que o ponto de ruptura do ensaio de tração ocorreu em uma das extremidades da zona útil do corpo de prova. Este comportamento foi similar em quase todos os casos.

Com isso é possível especular que algum dos processos tecnológico prévios interferiu de forma direta no resultado, assim obtendo-se em uma ruptura atípica que interfere na resistência a tração do material e nos gráficos de “tensão x deformação”.

Figura 23 – Corpos de prova após ensaio de tração.



Fonte: Autoria própria

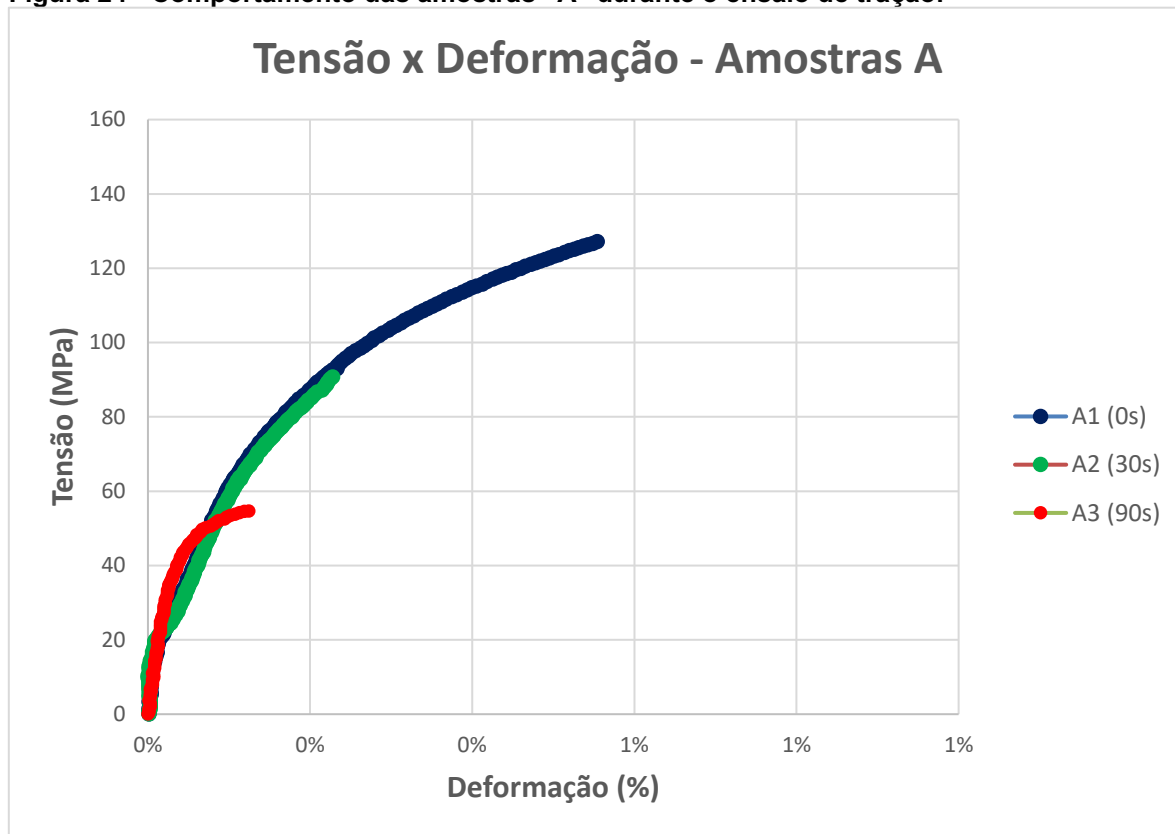
Outro fator plausível para a ruptura ocorrer nas extremidades do ensaio de tração é a solidificação do material durante o processo de fundição, podendo gerar uma variação de tensão em uma das extremidades e assim favorecendo o rompimento nessas áreas durante o ensaio de tração.

No gráfico da figura 24, apresenta-se o comportamento das amostras A. As escalas dos valores do gráfico são apresentadas no eixo Y os valores de tensão em que estão na unidade de MPa (10^6 PA), já o eixo X representa a deformação que está na forma de %.

Quando não foram adicionados elementos químicos (Ti, Sr), é possível observar, na figura 24, que as três amostras apresentam um comportamento semelhante até a tensão de 20 MPa e após este intervalo há uma pequena divergência no comportamento. Um fator visualizado nesse caso, é que o corpo de

prova com menor tempo de globularização apresentou valor maior de tensão, bem como deformação em relação aos demais.

Figura 24 - Comportamento das amostras “A” durante o ensaio de tração.

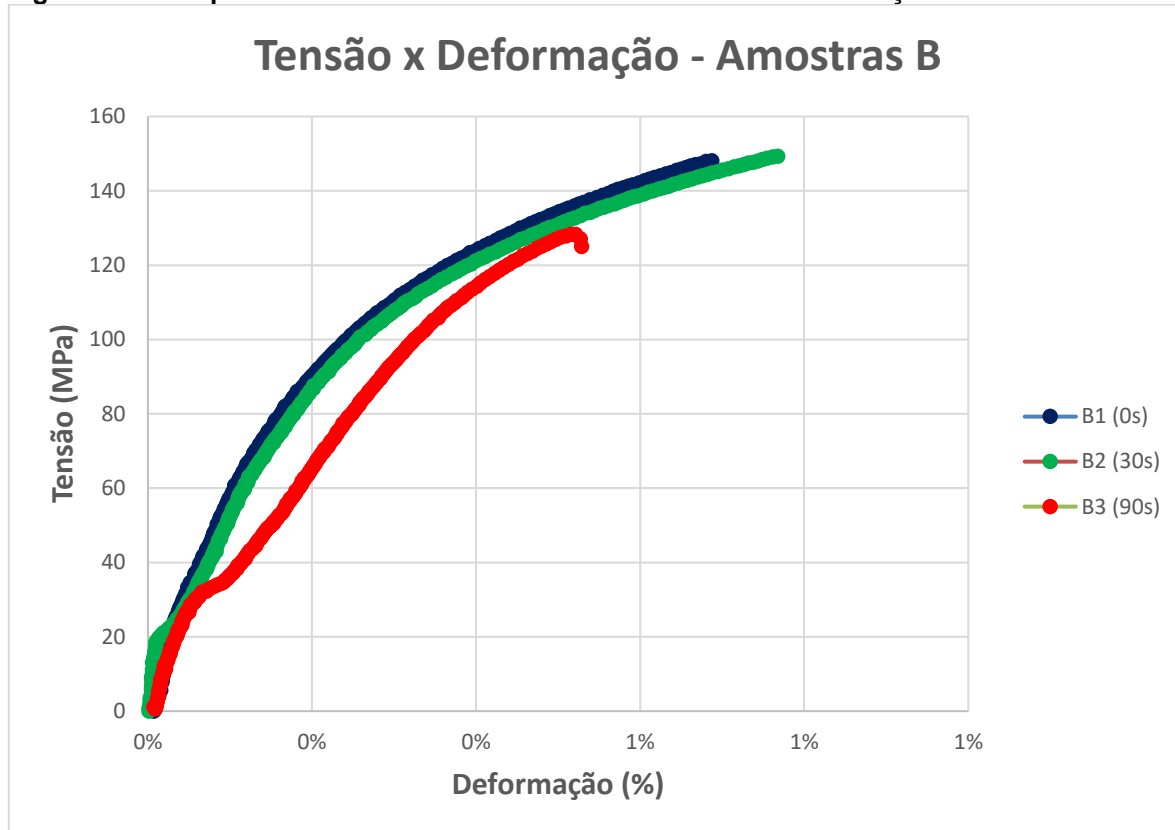


Fonte: Autoria própria

O gráfico da figura 25 contém as curvas tensão-deformação dos corpos de prova B, sendo possível observar que o corpo de prova B2 apresentou a maior deformação de todo o experimento. Ao contrário das amostras “A”, os corpos de provas B já possuem uma variação de comportamento desde o início do ensaio (0 MPa). Já as amostras B1 quanto B2 possuem uma tensão máxima próximas (150 MPa), além de uma deformação próximas, sendo que B2 possui um alongamento maior.

Nessa configuração, foi observado assim como nas amostras “A” que a menor tensão máxima do ensaio pertence a amostras A3, a mesma situação ocorreu no caso da amostra B3, possui a menor tensão entre os valores ensaiados para as ligas de A380 com refinador.

Figura 25 - Comportamento das amostras “B” durante o ensaio de tração.



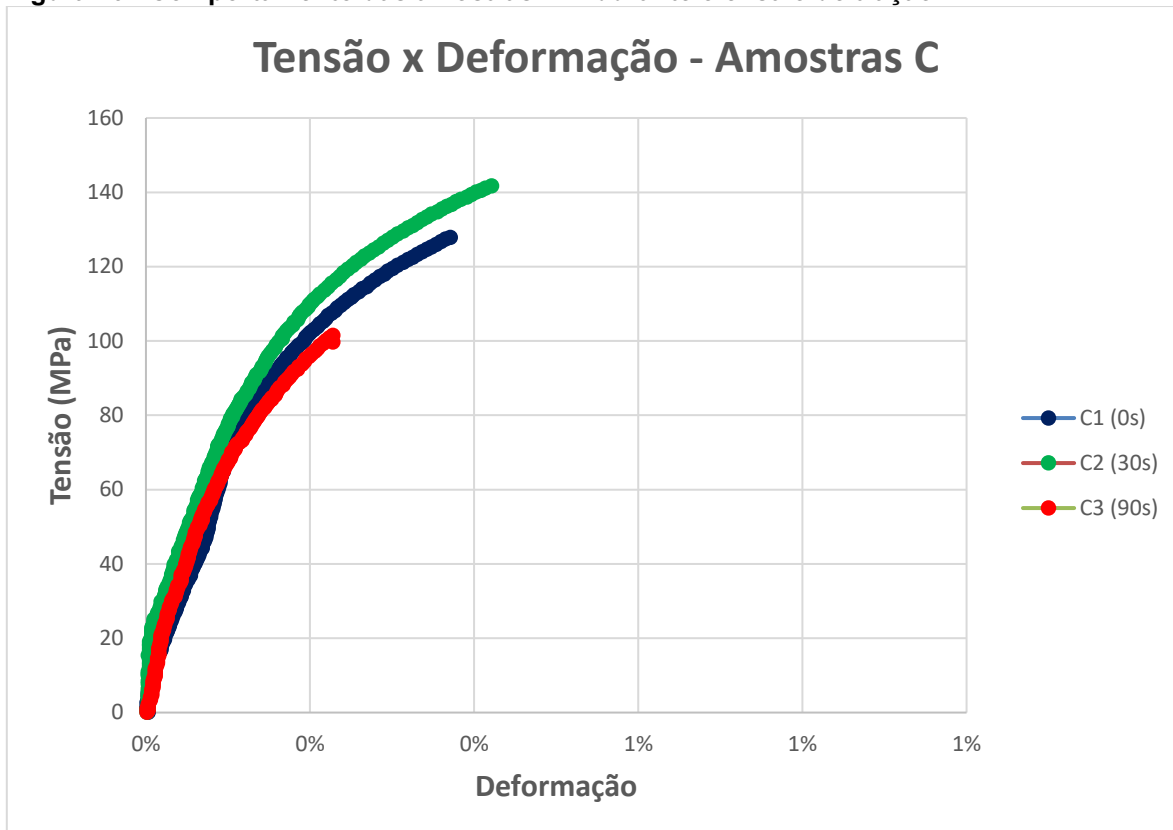
Fonte: Autoria própria

O gráfico apresentado na figura 26 demonstra o comportamento das amostras C, que possuem a adição de tanto refinador quanto modificador (200 ppm de Sr). Ao observar os resultados dos gráficos é possível visualizar que as amostras apresentam um comportamento parecido, porém defasado, até os 20 MPa um comportamento semelhante a uma reta, posteriormente uma leve curva e em aproximadamente 70 MPa inicia uma terceira curva até o ponto de ruptura.

O gráfico da figura 25 contém as curvas tensão-deformação dos corpos de prova B, sendo possível observar que o corpo de prova B2 apresentou a maior deformação de todo o experimento. Ao contrário das amostras “A”, os corpos de provas B já possuem uma variação de comportamento desde o início do ensaio (0 MPa). Já as amostras B1 quanto B2 possuem uma tensão máxima próximas (150 MPa), além de uma deformação próximas, sendo que B2 possui um alongamento maior.

Nessa configuração, foi observado assim como nas amostras “A” que a menor tensão máxima do ensaio pertence a amostras A3, a mesma situação ocorreu no caso da amostra B3, possui a menor tensão entre os valores ensaiados para as ligas de A380 com refinador.

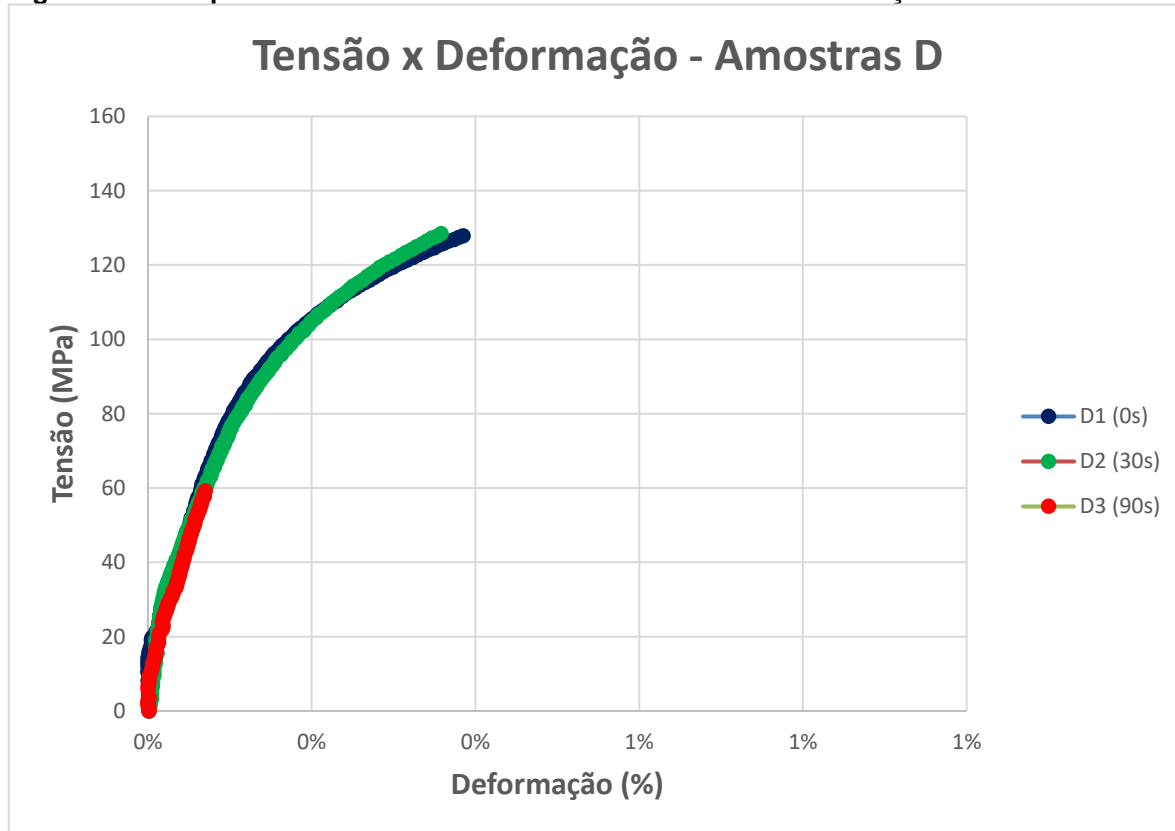
Figura 26 - Comportamento das amostras “C” durante o ensaio de tração.



Fonte: Autoria própria

Assim como nos demais ensaios foi repetido o mesmo resultado, o corpo de prova com 90 segundos de globularização apresentou a menor deformação, bem como a menor tensão suportada, seguida pela amostra C1 e posteriormente C2.

Figura 27 - Comportamento das amostras “D” durante o ensaio de tração.



Fonte: Autoria própria

Na figura 27, se verificam os valores do experimento D, no qual todas as amostras apresentaram um comportamento semelhante. Como nas outras condições, o corpo de prova que permaneceu 90 segundos na temperatura de semissólido, apresentou o pior desempenho do grupo.

Assim podemos criar uma relação de tempo de retenção com o comportamento mecânico das amostras, sendo que as amostras com sufixo 3 que sofreram globularização por 90 segundos apresentam uma tensão de ruptura baixa e menor deformação quando comparada com as demais. Já as ligas com nomenclaturas A e B se alternam no quesito de maior tensão e alongamento.

A tabela 4 apresenta um compilado entre todos os dados obtidos no ensaio de tração, podendo ser observado os valores de alongamento máximo bem com tensão máxima.

Tabela 4 - Compilado dos dados de ensaio de tração.

Dados do ensaio de tração		
Amostra	Tensão Máxima (MPa)	Alongamento Máximo (%)
A1	126,59	0,55%
A2	90,07	0,22%
A3	54,55	0,12%
B1	148,15	0,69%
B2	149,36	0,77%
B3	128,35	0,53%
C1	127,80	0,37%
C2	141,66	0,42%
C3	101,51	0,23%
D1	127,91	0,39%
D2	128,46	0,36%
D3	59,28	0,07%

Fonte: Autoria própria

4.3 RESULTADOS DE MICRODUREZA

Os ensaios de microdureza, foram realizados nas seções transversais das amostras tixoconformadas, como foi explicado anteriormente. Inicialmente são apresentadas na tabela 5, as medições de microdureza, para as amostras na condição como fundidas.

Sendo apresentados valores para o tipo de amostra, microdureza Vickers e desvio padrão dos de cada corpo de prova.

Tabela 5 - Microdureza das ligas confeccionas (sem sofrer a tixocoformação).

Amostra	Microdureza (HV)	Desvio Padrão
A Fundido	77,52	4,53
B Fundido	71,60	4,70
C Fundido	82,89	7,48
D Fundido	85,35	10,00

Fonte: Autoria própria

Ao observar os valores médios da microdureza da tabela 5, é difícil determinar o comportamento, pois a liga B que recebeu o refinador apresentou uma

microdureza menor que a liga padrão, já as ligas que foram modificadas com Sr apresentaram um aumento de dureza, entretanto um maior desvio padrão.

Após a realização dos ensaios de tração, as amostras tixoconformadas submetidas a medições de microdureza nas seções transversais das áreas que sofreram encruamento pela tração e são denominados pelos sufixos “T” (ex: AT3) e os valores obtidos de regiões sem encruamento são representados apenas pelas letras (ex: B2), conforme se observa na tabela 6.

Sendo que os valores apresentados para cada tipo de amostra são: a microdureza Vickers, o desvio padrão de cada corpo de prova e os valores agrupados conforme o tipo de corpo de prova na horizontal por tipo de liga e na vertical por região do corpo de prova.

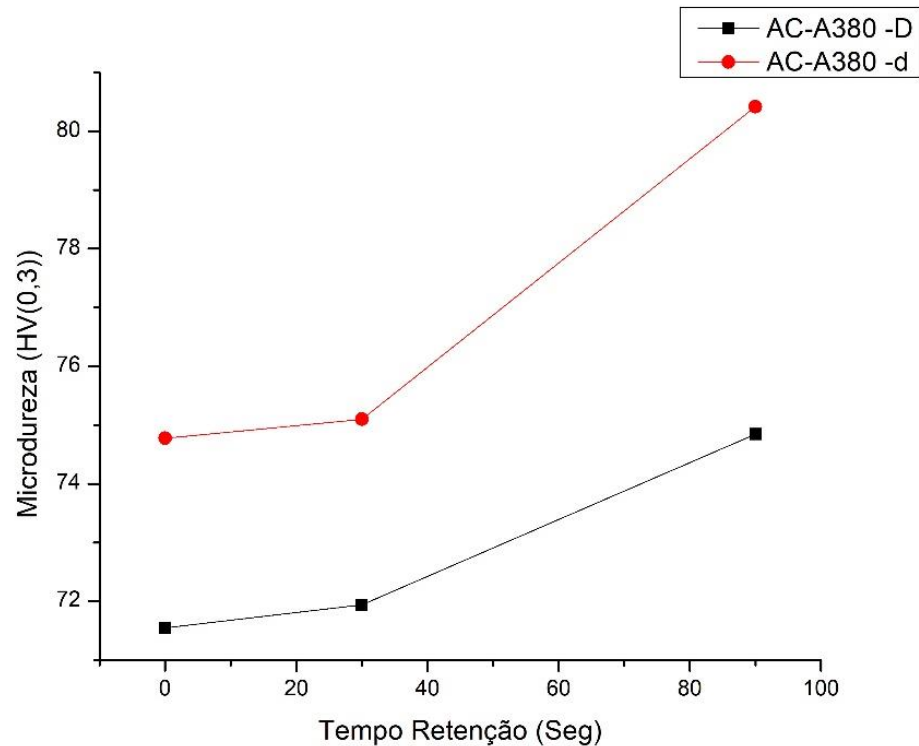
Tabela 6 - Microdureza das ligas em regiões variadas do corpo de prova de tração.

Regiões não tracionadas			Regiões tracionadas		
Amostra	Microdureza (HV)	Desvio Padrão	Amostra	Microdureza (HV)	Desvio Padrão
A1	71,55	3,92	AT1	74,78	5,45
A2	71,94	5,16	AT2	75,1	4,51
A3	74,85	3,42	AT3	80,42	2,56
B1	72,86	6,25	BT1	79,51	5,36
B2	78,51	5,03	BT2	84,12	4,88
B3	79,13	7,49	BT3	72,17	3,58
C1	81,01	9,87	CT1	76,41	4,02
C2	79,21	5,56	CT2	83,58	6,23
C3	76,31	5,41	CT3	75,12	6,44
D1	89,1	5,91	DT1	81,8	6,12
D2	87,4	5,27	DT2	83,32	6,57
D3	85,8	6,18	DT3	75,12	6,78

Fonte: Autoria própria

Com isso foi realizado os gráficos com os valores obtidos da microdureza de cada material para demonstrar de maneira gráfica o comportamento das ligas de alumínio A380 com adição de refinador e modificador.

Figura 28 - Microdureza do alumínio tixoconformado A (A380).



Fonte: Autoria própria

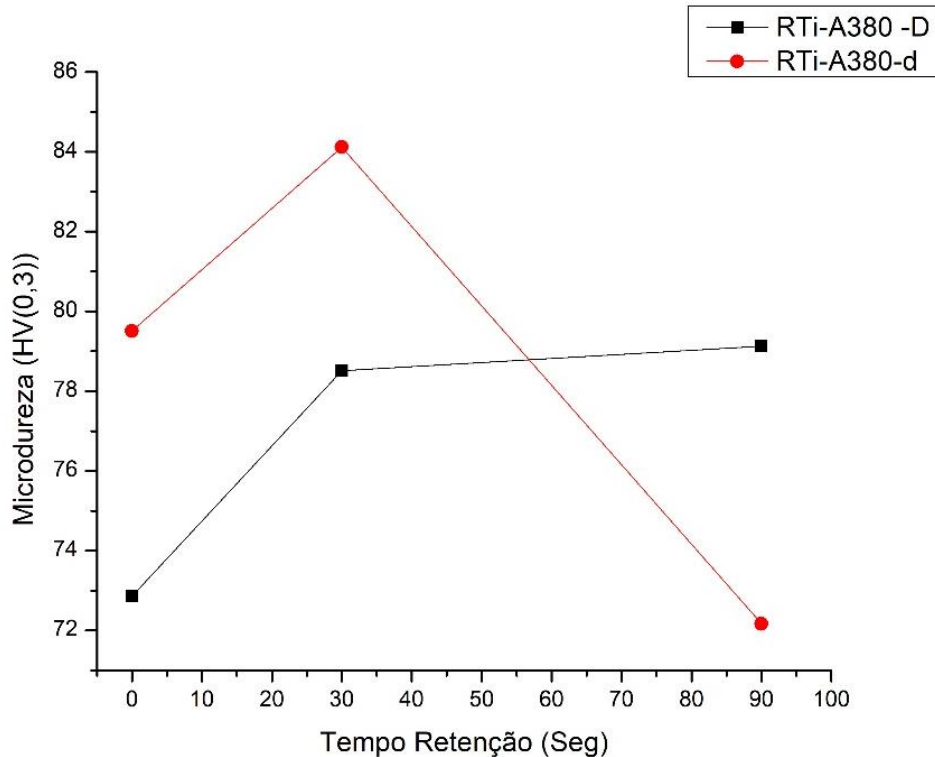
No gráfico da figura 28, é possível observar os valores da microdureza em relação ao tempo de retenção, nas amostras como fundidas, sem adição de refinador ou modificador. Sendo D a região de maior diâmetro (sem deformação) e d a região de menor diâmetro (região mais deformada) do corpo de prova de tração.

Ainda na figura 28 é possível perceber que os valores de microdureza aumentaram de forma proporcional nas regiões tracionadas em comparação às não tracionadas, isso se dá pelo encruamento ocasionado pelo ensaio de tração. Isto acontece independentemente do tempo de retenção usado. Também se observa que com o aumento do tempo de retenção a microdureza foi maior, nestas amostras sem adição de refinadores e modificadores.

Na figura 29, se observa o comportamento da microdureza nas amostras que foram refinadas, é observado um aumento de microdureza nas amostras com 30 segundos de retenção. Nas amostra que passaram 90 segundos globularizando houve uma inversão quanto na microdureza, no caso da medições na região com

maior deformação apresentou uma diminuição importante na microdureza, ficando abaixo das amostras com 90 segundos de tempo de retenção na região que não sofreu deformação resultante do ensaio de tração e também abaixo da amostra que ficou 0 segundo de retenção sobre o estado de semissólido.

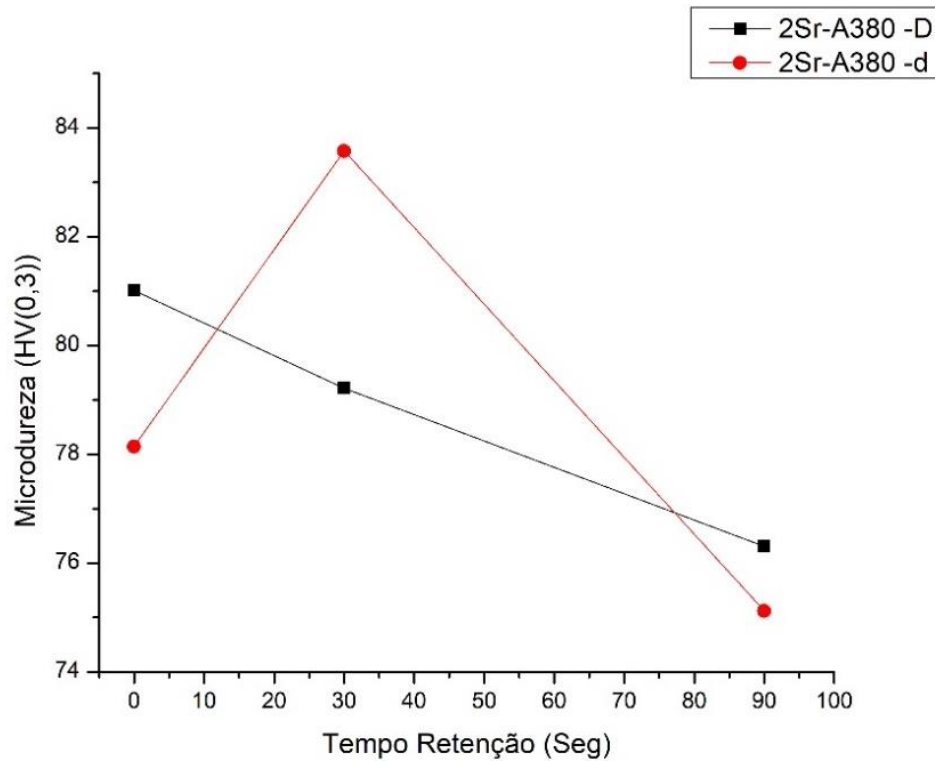
Figura 29 -Microdureza do alumínio tixoconformado B (A380 + Refinador).



Fonte: Autoria própria

No gráfico da figura 30, se mostram os valores de microdureza das amostras possuem o acréscimo de Sr, e nesse caso a microdureza do material extraído da seção de sem deformação apresentou uma queda com caráter linear. Em contrapartida a microdureza de secção menor, com maior deformação apresentou um comportamento complexo, visto que na amostra com 0 segundo de retenção possui uma microdureza inferior à da amostra de maior seção. Na amostra de 30 segundo há um aumento chegando ao maior microdureza das amostras com 200 ppm de estrôncio e por fim na amostra de 90 segundos apresenta uma redução abrupta no valor da microdureza, alcançando a menor microdureza das amostras na condição C.

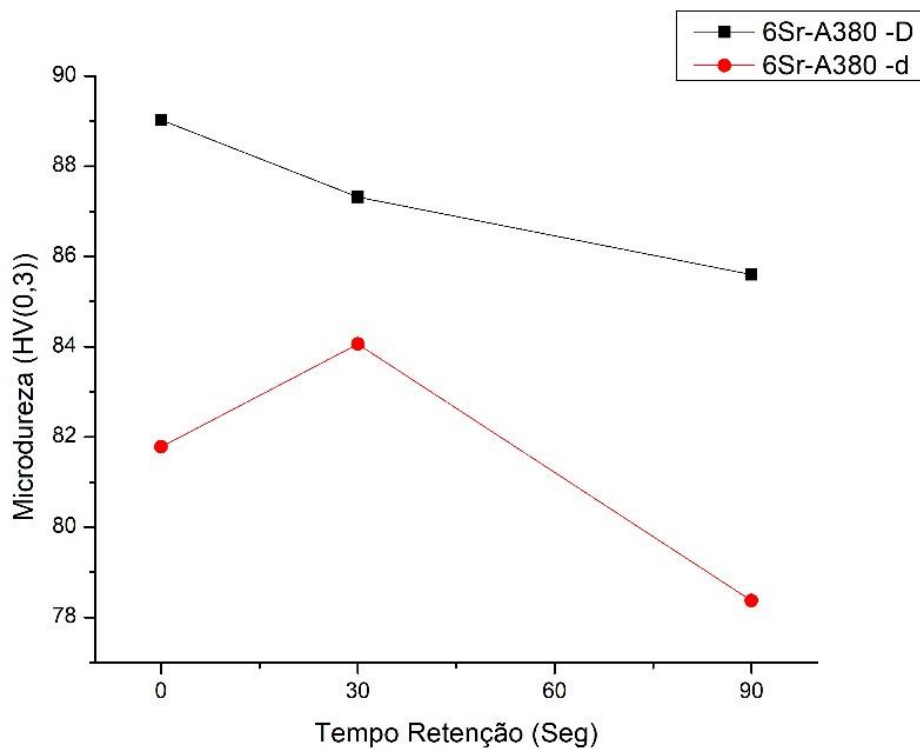
Figura 30 - Microdureza do alumínio tixoconformado C (A380 + Refinador + 200 ppm modificador).



Fonte: Autoria própria

Na figura 31, se observa que o tempo de retenção de 0 a 90 segundos provocou uma diminuição da microdureza das amostras tixoconformadas com 600 ppm de Sr, independentemente da deformação da zona (d ou D).

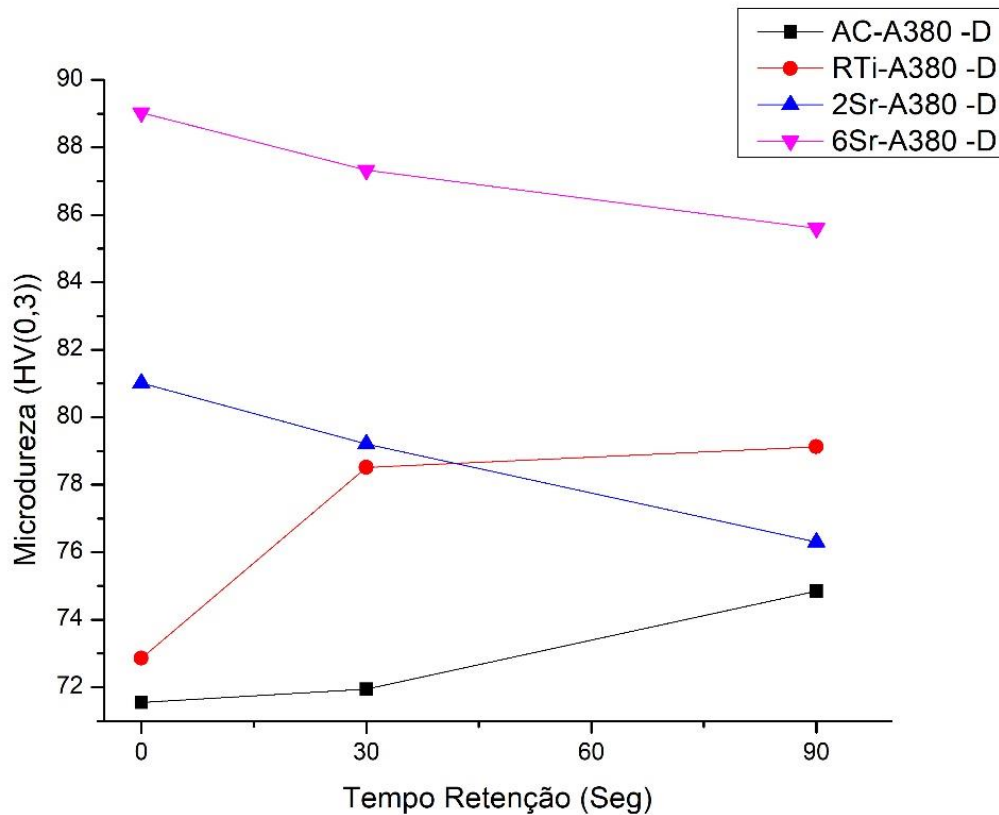
Figura 31. Microdureza do alumínio tixoconformado C (A380 + Refinador + 600 ppm modificador).



Fonte: Autoria própria

Ao observar os valores de microdureza do gráfico da figura 32, se constata que na seção sem deformação representados pela letra D, o valor da microdureza aumenta com o tempo de retenção de 0 a 90 segundos, nas amostras tixoconformadas nas condições como fundidas e refinadas. No entanto, nas amostras modificadas com 200 e 600 ppm de Sr a microdureza diminui com o aumento do tempo de retenção.

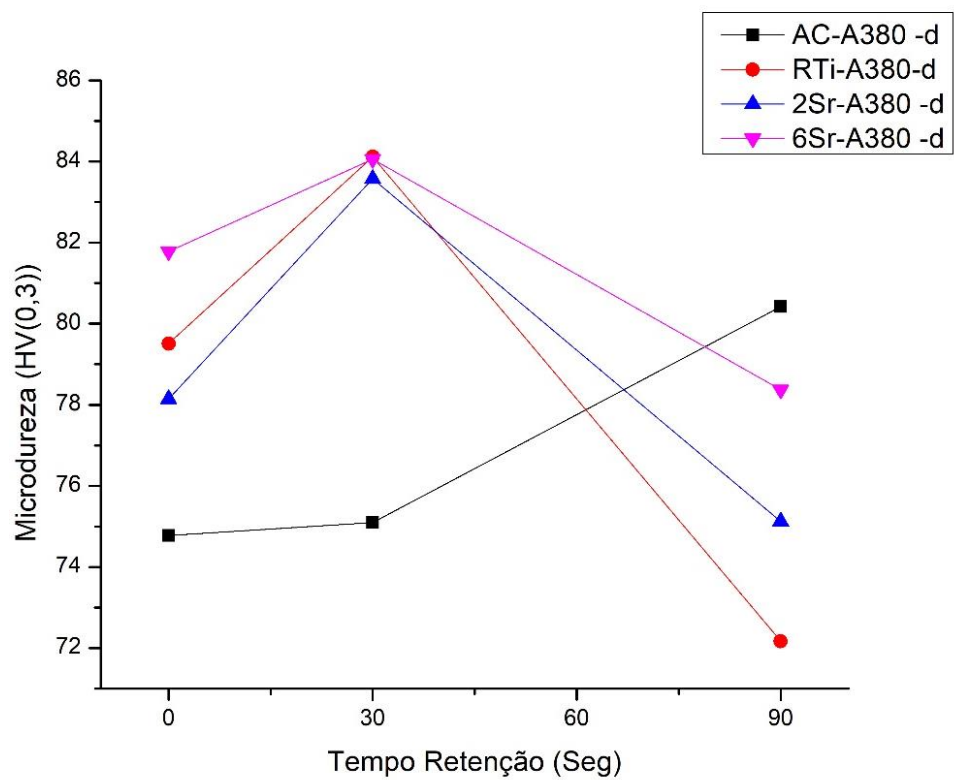
Figura 32 - Compilado dos ensaios de microdureza da seção de diâmetro maior.



Fonte: Autoria própria

No gráfico da figura 33, contém os valores obtidos de microdureza na seção de maior deformação plástica (d) e é possível observar que na média os maiores de microdureza foram obtidos nas amostras com 30 segundos de tempo de retenção, nas amostras refinadas, e modificadas com 200 pp e 600 ppm de Sr. Como já foi verificado quando o tempo é aumentado para 90 segundos a microdureza diminui. Nas amostras tixoconformadas na condição como fundida, a microdureza aumenta com o incremento do tempo de retenção, também na região de maior deformação dos corpos de prova.

Figura 33- Compilado dos ensaios de microdureza da seção e diâmetro menor.



Fonte: Autoria própria

5 CONCLUSÃO

As principais conclusões do trabalho se relacionam a seguir:

Durante o ensaio de tração houve uma certa variação dos resultados obtidos dos processos, visto os comportamentos dos gráficos. Contudo foi possível observar a existência um possível ponto ótimo de globularização para o alumínio A380.

Na questão metalográfica, quando compararmos os dados coletados, podemos observar que a adição de elementos refinadores (titânio) e modificadores (estrôncio) afetam a liga, gerando uma modificação na microestrutura, esse efeito é catalisado quando a liga sofre o processo de globularização, sendo que o formato que mais se aproxima a microestrutura é a forma de roseta .

Durante os experimentos foi possível observar que a liga B que passa 30 segundos no processo de globularização apresentou o melhor desempenho, sendo assim, há um ponto de otimização do processo.

Foi observado uma certa tendência de aumentar a microdureza do metal com a adição dos elementos que provocam a alteração da microestrutura (ex: Titânio e Estrôncio). Contudo os resultados obtidos de microdureza apresentaram uma grande variação, visto que os desvios padrões obtidos para amostras com estrôncio foi alto.

Apesar da liga apresentar um baixo nível de deformação e impurezas visto que se trata de uma liga reciclada, foi possível realizar os procedimentos como usinagem e tixoconformação sem grandes complicações.

REFERÊNCIAS

ATKINSON, H. V. Modelling the semisolid processing of metallic alloys. **Progress in Materials Science**, v. 50, p. 341-412, 2005.

BATALHA, G. F. **Introdução Manufatura Mecânica**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2003. Disponível em: <<http://sites.poli.usp.br/d/pmr2202/arquivos/transparencias2202.pdf>> Acesso em: 26 de outubro de 2017.

BAPTÍSTA, André Luís de Brito; SOARES, Ângelo Rosestolato; NASCIMENTO, Ivaldo Assis do. **O Ensaio Metalográfico no Controle da Qualidade**. Disponível em: . Acesso em: 20 ago. 2007

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

DALCIN, Gabrieli Bortoli. **ENSAIOS DOS MATERIAIS**. 2007. 41 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Industrial Mecânica, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Rio de Janeiro, 2007.

FERREIRA, João Paulo Gabre. **ESTUDO MICROESTRUTURAL E REOLÓGICO DA LIGA RECICLADA DE ALUMÍNIO A380 MODIFICADA PELA ADIÇÃO DE ESTRÔNCIO**. 2017. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaio dos materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

IRIZALP, S. G.; SAKLAKOGLU, N.; Effect of Fe-rich Intermetallics on the Microstructure and Mechanical Properties of Thixoformed A380 Aluminum alloy. **Engineering Science and Technology**, v.17, p.58-52, 2014.

KARAMOUZ, M.; AZARBARMAS, M.; EMAMY, M.; Alipour, M.; Microstructure, Hardness and Tensile Properties of A380 Aluminum Alloy With and Without Li Additions. **Materials Science and Engineering A**, v.582, p.409-414, 2013.

KASHYAP, K. T.; CHANDRASHEKAR, T. Effects and mechanisms of grain refinement in aluminium alloys. **Bull. Materials Science**, v. 24, n. 4, p. 345-353, 2001.

KEARNEY, A. L.; Avery Kearney and Company. **Properties of Cast Aluminum Alloys**. In: ASM. Metals Handbook – Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, v. 2 – p.590, 1991.

KORI, S. A.; MURTY, B. S.; CHAKRABORTY, M. Development of a grain refiner for Al-7Si alloy. **Materials Science and Engineering A**, v. 280, p. 58-61, 2000.

KORI, S. A.; MURTY, B. S.; CHAKRABORTY, M. Development of efficient grain refiner for Al-Si alloy and its modification with strontium. **Materials Science and Engineering A**, v. 283, p. 94-104, 2000.

LOURENÇATO, L.A. **Tixofornabilidade e Tixoforjamento de Ligas AlXwt%Si-0,5wt%Mg em Prensa Excêntrica com Matriz Aberta**. 2008. 181 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2008.

MAKHLOUF, M. M.; GUTHY, H. V. The aluminium-silicon eutectic reaction: mechanisms and crystallography. **Journal of Light Metals**, v. 1, p. 199-218, 2001.

MCCARTNEY, D. G. Grain refining of aluminium and its alloys using inoculants. **International Materials Reviews**, v. 34, n° 5, p. 247-260, 1989.

NOGUEIRA, Lucas Simão. **Caracterização da liga Al-5wt%Si-0,5wt%Mg para tixoconformação**. 2014. 53 f. Trabalho de Conclusão de Curso de (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2014.

VIEIRA, E. A.; FREITAS, E. R.; FERRANTE, M. **Influência do tempo de espera na fluidez da liga comercial A356 com estrutura globular no estado semi-sólido**. Ouro Preto: Rev. Esc. Minas [online], 2011, vol.64. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rem/v64n4/a08v64n4.pdf>.> Acesso em: 26 de outubro de 2017.