

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**JULIO CESAR ALVES MARTINS**

**INSTALAÇÃO DE FORNO NA MÁQUINA DE ENSAIO DE TRAÇÃO DO  
LABORATÓRIO H005 E VALIDAÇÃO DO ENSAIO DE TRAÇÃO À  
QUENTE NO MATERIAL AI T6-6351**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PATO BRANCO**

**2018**

JULIO CESAR ALVES MARTINS

**INSTALAÇÃO DE FORNO NA MÁQUINA DE ENSAIO DE  
TRAÇÃO DO LABORATÓRIO H005 E VALIDAÇÃO DO  
ENSAIO DE TRAÇÃO À QUENTE NO MATERIAL AI T6-6351**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 1, do Curso de Engenharia Mecânica da Coordenação de Engenharia Mecânica – COEM – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientadora: Prof. Dr. Maria Nalu Verona

PATO BRANCO

2018

FOLHA DE APROVAÇÃO

**INSTALAÇÃO DE FORNO NA MÁQUINA DE ENSAIO DE  
TRAÇÃO DO LABORATÓRIO H005 E VALIDAÇÃO DO  
ENSAIO DE TRAÇÃO À QUENTE NO MATERIAL AI T6-6351**

Julio Cesar Alves Martins

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 21/11/2018 como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Mecânico, do curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Pato Branco (UTFPR-PB). O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora julgou o trabalho **APROVADO**.

---

Prof. Dr. Dalmarino Setti  
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

---

Prof. Dr. Bruno Bellini Medeiros  
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

---

Profa. Dra. Maria Nalu Verona  
(UTFPR – Departamento de Mecânica)  
Orientador

---

Prof. Dr. Paulo Cesar Adamczuk  
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Mecânica



## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus familiares que sempre me ajudaram dando força e incentivo, mas em especial ao meu Padrinho, Flávio Leblein e a minha esposa Débora Fernanda, que contribuíram de forma acintosa para que pudesse concluir a graduação.

## AGRADECIMENTOS

A professora Ma. Silvana Patrícia Verona, pela orientação no início do trabalho e pela indicação do tema.

A professora Dr. Maria Nalu pela orientação, conhecimento e direcionamento deste trabalho, por estar sempre à disposição quando necessário.

Ao professor Paulo Cezar Adamczuk, por emprestar e auxiliar nos ensaios de teste do forno, com o equipamento de aquisição de dados.

Ao laboratorista Gustavo, por auxiliar na fabricação dos primeiros corpos de prova.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná – campus Pato Branco, pela possibilidade de realizar tanto a fabricação dos corpos de prova quanto os ensaios, disponibilizando materiais e equipamentos necessários para tal.

A todos meus familiares que de forma direta contribuíram para que eu pudesse chegar até aqui, com muito esforço e sacrifícios ao longo do caminho.

## EPÍGRAFE

“Há apenas uma maneira de evitar críticas:  
Não falar, não fazer e não ser nada” (Aristóteles).

## RESUMO

MARTINS, Julio Cesar. Instalação de forno na máquina de ensaio de tração do laboratório h005 e validação do ensaio de tração à quente no material Al T6-6351. 2018. Trabalho para conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2018.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um projeto de estrutura metálica, para adaptação de um forno elétrico, disponível no laboratório de ensaios (H005) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, à máquina universal de ensaio de tração para ensaios de tração à quente, concedendo um procedimento de ensaios para fins didáticos e de pesquisa. Apresenta conceitos de fluência e tração à quente, estágios de fluência, curvas de fluência, diferentes tipos de ensaio de fluência, obtenção das propriedades de limite de resistência a tração, características das propriedades mecânicas e metalúrgicas dos ensaios sob temperaturas elevadas. O estudo verificou o comportamento da liga Al 6351 – T6 quando ensaiado sob temperaturas de elevadas.

**Palavras-chave:** Tração à Quente, propriedades metalúrgicas e mecânicas, Liga de Alumínio 6351 – T6.



## ABSTRACT

MARTINS, Julio Cesar. Installation of furnace in the laboratory tensile testing machine h005 and validation of the hot traction test in Al T6-6351 material. 2018. Work for conclusion of Course (Graduation in Mechanical Engineering) - Federal Technological of Paraná. Pato Branco2018.

This work presents the development of a metal structure design for the adaptation of an electric furnace, available in the experimental laboratory (H005) of the Federal Technological University of Paraná, to the universal tensile testing machine for heat traction tests, granting a test procedure for didactic and research purposes. It presents concepts of creep and tensile strength, creep stages, creep curves, different types of creep test, tensile strength limit properties, characteristics of the mechanical and metallurgical properties of the tests under high temperatures. The study verified the behavior of Al 6351 - T6 alloy when tested under high temperatures.

**Key words:** Hot Draw, Metallurgical and Mechanical Properties, Aluminum Alloy 6351 - T6.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Salto de Discordâncias.....	20
Figura 2 - Representação esquemática da fluência por difusão em uma microestrutura de grãos.....	21
Figura 3 - Fluxo de vazios resultando em aumento de comprimento de grão.....	23
Figura 4 - Fluxo de vacâncias através do volume do grão (Nabarro-Herring) ou ao longo do contorno de grão (Coble) .....	24
Figura 5 - Deslizamento de discordâncias em baixas temperaturas. a) Superação da barreira de Peierls; b) Interação entre as partículas de precipitado .....	25
Figura 6 - Curva típica de fluência mostrando os três estágios do processo. Curva A, ensaio de carga constante; Curva B, ensaio de tensão constante.....	28
Figura 7 - Representação do efeito da tensão nas curvas de fluência à temperatura constante .....	29
Figura 8 - Curva tensão-log tempo para aço autêntico de baixo carbono, forjado pelo ensaio de fluência e ruptura por fluência.....	33
Figura 9 - Padrão das linhas de iso-tensão no espaço $\log(\text{tr}) \times 1/T$ .....	35
Figura 10 - Conversão de uma família de dados $\text{Log}(\sigma) \times \text{Log}(\text{tr})$ em uma única curva de referência $\text{Log}(\sigma) \times \text{PLM}$ .....	35
Figura 11 - Padrão das linhas de iso-tensão no espaço $\log(\text{tr}) \times T$ .....	36
Figura 12 - Conversão de uma família de dados $\text{Log}(\sigma) \times \text{Log}(\text{tr})$ em uma única curva de referência $\text{Log}(\sigma) \times P$ , segundo o método de Manson-Haferd.....	36
Figura 13 - Relação entre ensaio e tempo de serviço.....	38
Figura 14 - Curva Convenciona Tensão-Deformação típica de um ensaio de tração.....	40
Figura 15 - Comparação entre as curvas tensão-deformação verdadeira e convencional....	41
Figura 16 - Analogia dos parâmetros envolvidos nos testes de tração a quente e fluência e seus aspectos de equivalência. ....	43
Figura 17 - Temperatura de Ensaio e Variações Permissíveis .....	44
Figura 18 - Características das ligas de Alumínio e suas aplicações .....	46
Figura 19 - Condições de Temperas.....	47
Figura 20 - Fluxograma .....	48
Figura 21 - Corpo de Prova utilizado no ensaio de tração .....	49
Figura 22 - Dimensões do Corpo de Prova .....	50
Figura 23 - Proporcionalidade utilizada para os corpos de prova .....	50
Figura 24 - Composição Química da liga Al 6351 – T6.....	51
Figura 25 - Propriedades mecânicas .....	51
Figura 26 - Dimensionamento do Corpo de Prova .....	51
Figura 27 - Composição Química do Aço Inox 310.....	52
Figura 28 - Forno elétrico INTI – FT 1200 R.....	54
Figura 29 - Dados Forno elétrico INTI – FT 1200 R.....	55
Figura 30 - Equipamento de Medição, Data Logger 3.....	57
Figura 31 - Disposição Termopares dentro do Forno.....	58
Figura 32 - Fabricação e montagem do articulador e alongador .....	59
Figura 33 - Projeto da luva de conexão .....	60
Figura 34 - Montagem do conjunto .....	60
Figura 35 Montagem do Conjunto de Ensaio na Máquina de Tração.....	61

Figura 36 - Corpo de Prova Usinado .....	62
Figura 37 - Projeto da Estrutura Metálica .....	63
Figura 38 - Montagem da Estrutura e Acoplamento do forno. ....	63
Figura 39 - Tensão x Deformação – Temperatura Ambiente C.P. 01, C.P. 02 e C.P. 03 .....	65
Figura 40 - Curva Temperatura x Tempo – C.P. 01 – 175°C.....	67
Figura 41 - Curva Tensão x Deformação para os C.P. 01, 02 e 03 – 175°C.....	68
Figura 42 - Curva Temperatura x Tempo – C.P. 02 – 175°C.....	68
Figura 43 - Curva Temperatura x Tempo – C.P. 03 – 175°C.....	69
Figura 44 - Curva Temperatura x Tempo – C.P. 01 – 275°C.....	70
Figura 45 - Curva Tensão x Deformação para os C.P. 01, 02 e 03 – 275°C.....	70
Figura 46 - Curva Temperatura x Tempo – C.P. 02 – 275°C.....	71
Figura 47 - Curva Temperatura x Tempo – C.P. 03 – 275°C.....	71
Figura 48 - Dados para comparação - Ensaio de Tração a Quente para liga A 6351 – T6 ...	73

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre temperatura e deformação .....	44
Tabela 2 - Faixas do Termopar Tipo K .....	56
Tabela 3 - Parâmetros de Ensaio .....	64
Tabela 4 - Limite de Resistencia à Tração C. P. Temperatura Ambiente.....	65
Tabela 5 - Dados de Ensaio de Tração a Temperatura Ambiente.....	66
Tabela 6 - Percentuais derivados do ensaio a Temperatura Ambiente.....	66
Tabela 7: Dados dos C. P. – Ensaio à 175°C.....	69
Tabela 8: Limite de Resistencia à Tração – Ensaio 175°C .....	69
Tabela 9: Dados do C. P. – Ensaio à 275°C.....	72
Tabela 10: Limite de Resistencia à Tração – Ensaio 275°C .....	72

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	15
1.2 Problema.....	16
1.3 Justificativa .....	16
2 OBJETIVOS .....	17
2.1 Objetivos Gerais.....	17
2.2 Objetivos Específicos.....	17
3 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO.....	18
3.1 Fenômeno de Fluência.....	18
3.1.1 Efeito das Altas Temperaturas nos Materiais .....	19
3.2 Mecanismos de Fluência.....	20
3.2.1 Mecanismos de Deformação em Fluência.....	20
3.2.1.1 Transporte de Átomos por Difusão.....	21
3.2.1.2 Deformação por Deslizamento e Escalagem de Discordâncias.....	24
3.2.1.3 Escorregamento dos Contornos de Grãos .....	26
3.3 Curvas de Fluência .....	27
3.3.1 Estágio 1 .....	30
3.3.2 Estágio 2.....	30
3.3.3 Estágio 3.....	31
3.4 Ensaio de fluência .....	32
3.4.1 Ensaio de Fluência a Tensão e Força Constante .....	32
3.4.2 Ensaio de Ruptura por Fluência .....	33
3.4.3 Ensaio de Relaxação .....	34
3.5 Métodos de Extrapolação.....	34
3.6 Ensaio de Tração à Quente .....	39
3.6.1 Curva Tensão e Deformação .....	39
3.7 Relação entre Tração a Quente e Fluência .....	41

3.8 Normas de Ensaio para Fluência .....	43
3.8.1 Temperatura de Ensaio .....	44
3.9.1 Liga de Alumínio 6351-T6 .....	46
4 METODOLOGIA .....	48
4.1 Corpos de Prova .....	49
4.2 Conjunto de Fixação do C.P. ....	51
4.3 Estrutura de Acoplamento do Forno na Máquina Universal de Ensaio (Máquina de Tração) .....	53
4.4 Montagem do Sistema .....	53
4.5 Forno de Fluência .....	54
4.6 Ensaio do C.P. ....	55
4.7 Descrição dos Procedimentos .....	55
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	59
5.1 Dispositivos de Fixação e Corpos de Prova .....	59
5.3 Estrutura de Fixação e acoplamento do forno na máquina de tração .....	62
5.4 Procedimento de Ensaio em tração à Quente .....	64
5.5 Ensaio do Corpo de Prova em Alumínio 6351-T6.....	64
5.5.1 Ensaio de Tração a Temperatura Ambiente. ....	64
5.4.2 Ensaio de Tração à Quente a Temperatura de 175°C .....	66
5.4.3 Ensaio de Tração à Quente a Temperatura de 275°C .....	70
6 CONCLUSÃO .....	75
REFERÊNCIAS .....	76
<b>APENDICE A</b> .....	<b>79</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo Souza (1982) sabe-se que a temperatura afeta as propriedades mecânicas dos metais e que o ensaio de fluência possui algumas semelhanças com o ensaio de tração por possuírem algumas variáveis em comum, como carga, alongamento e temperatura, mas no ensaio de fluência é adicionado mais uma variável, o tempo.

Frequentemente os materiais são submetidos a trabalharem por longos períodos sob condições de tensão elevada assim como a temperatura. Condições estas que são favoráveis para a mudança do comportamento dos materiais em função do processo de difusão dos átomos, movimento das discordâncias, escorregamento de contornos de grãos e de recristalização. Para analisar este comportamento se faz necessário à análise do ensaio de fluência que consiste na aplicação de uma carga constante em um corpo de prova por determinado tempo, quando submetido a temperaturas mais elevadas (GARCIA, 2008).

Ainda segundo Garcia (2008) este ensaio tem como objetivo a determinação da vida útil de determinados materiais submetidos às condições já mencionadas. Entre tantos materiais ensaiados em fluência, podem ser citadas alguns, como os que são empregados em refinarias petroquímicas, usinas nucleares, indústrias aeroespaciais, tubulações, turbinas, entre outros. Por se tratar de um ensaio de longa duração, o ensaio de fluência não pode ser caracterizado como sendo um ensaio de rotina, mas existem algumas técnicas de extrapolação de resultados para longos períodos e também ensaios alternativos caracterizados como mais severos.

## 1.2 Problema

Sabe-se que cada vez mais o setor de engenharia busca alternativas para poder se trabalhar com materiais em elevadas temperaturas. Tendo em vista que a universidade ainda não possui um modo de análise que possa gerar a curva de fluência para os materiais, e que isto é de extrema importância sabendo que cada material possui comportamento distintos quando submetidos condições de tensão e temperatura elevadas, chegando a ocorrer em alguns casos à fluência em temperatura ambiente, o problema proposto é de usufruir da máquina de tração para adaptar e realizar futuros ensaios de tração a quente e identificar características de fluência.

## 1.3 Justificativa

A escolha do tema tem relação com o aproveitamento dos recursos disponíveis na universidade, pois o forno utilizado para a realização do ensaio de fluência encontra-se em desuso, e possui condições de ser acoplado a máquina de tração ocasionando benefícios para a área de pesquisa da instituição.



## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivos Gerais

Desenvolver um sistema que permita acoplar um forno de pequeno porte à máquina de tração para fins didáticos e de pesquisa para realização de ensaios de fluência e tração à quente no laboratório de ensaios localizado na Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

### 2.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver um suporte para um forno de pequeno porte;
- Colocar em operação a máquina de ensaios com o forno acoplado para a realização de ensaio de fluência e tração à quente;
- Ensaiar um corpo de prova Al 6351-T6;
- Gerar a curva de tração à quente do material ensaiado;
- Criar procedimento de ensaio para tração à quente;

### 3 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

#### 3.1 Fenômeno de Fluência

Com frequência os materiais são colocados em serviço, seja por ordem de projeto ou não, a temperaturas elevadas e que podem vir a sofrer tensões mecânicas estáticas, que por sua vez acarreta em deformações ao longo de sua vida útil. A fluência pode ser definida ou caracterizada por uma deformação permanente e dependente do tempo que uma peça sofre devido a condições de tensão e temperatura a ela aplicada (CALLISTER, 2002).

A fluência torna-se um fenômeno de importância quando os materiais atingem cerca de 0,4  $T_f$ , ou seja, quando um material é submetido a uma determinada carga e se encontra a uma temperatura que se aproxima de quarenta por cento de sua temperatura de fusão em Kelvin, e portanto nesta faixa de temperatura a difusão é significativa. A difusão é um fenômeno termicamente ativado que é relacionado de forma exponencial com a temperatura. Quando um material trabalha abaixo de 0,4 da temperatura de fusão o coeficiente de difusão se torna tão baixo que o mecanismo de deformação plástica por fluência se torna muito lento e por consequência desprezível (PADILHA, 2000).

Segundo Souza (1982), com relação aos materiais metálicos, a temperatura tem grande influência no fenômeno da fluência. Sendo assim, um ensaio de tração realizado em uma liga metálica à temperatura ambiente possui muito pouca variação tendo como ponto de partida o tempo de duração do ensaio em si, como por exemplo, ele pode durar 2 horas ou 2 minutos o que para as atividades práticas ele acaba possuindo as mesmas características. Em contrapartida se um material metálico for analisado em temperaturas mais elevadas a resistência mecânica se torna muito dependente do tempo, assim como a velocidade de deformação quando submetido a um esforço mecânico. Ainda ressaltando que um ensaio de tração normal não possui relação com o ensaio de fluência, por possuírem resultados distintos.

A fluência é caracterizada por um escoamento lento do material. Caso um componente mecânico esteja submetido à carga trativa constante, a diminuição da área da seção transversal ocasiona um aumento na tensão. Quando se alcança o

ponto em que o material não pode mais resistir estaticamente a carga aplicada, ocorre a sua ruptura (Meyers e Chawla, 1982).

### 3.1.1 Efeito das Altas Temperaturas nos Materiais

Segundo Dieter (1981) deve-se esperar que os processos controlados por difusão exerçam influência sobre as propriedades mecânicas a altas temperaturas sabendo que a mobilidade dos átomos cresce rapidamente com o aumento da temperatura. Altas temperaturas também favorecem uma maior mobilidade as discordâncias através do mecanismo de escalagem, que se torna importante devido a maior facilidade de difusão e também por que a concentração de lacunas em equilíbrio aumenta com a temperatura, podendo ainda a essas condições tornar operativo novos mecanismos de deformação.

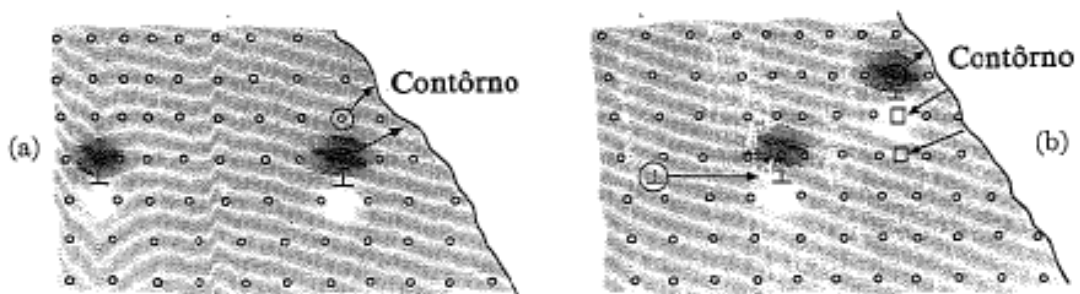
Ainda segundo Dieter (1981), os contornos de grãos permitem uma possibilidade adicional para a continuidade da deformação nas ligas metálicas. Outro fator importante é o período em que estas ligas metálicas permanecem expostas a essas elevadas temperaturas levando em consideração as suas estabilidades metalúrgicas.

Segundo Gobbi (2013) o comportamento dos metais em alta temperatura está relacionado com a presença de imperfeições cristalinas, devido à maior mobilidade atômica, e conseqüentemente aos processos que envolvem o fenômeno da difusão. A temperatura elevada aumenta a capacidade de movimentação de discordâncias e pode ativar outros mecanismos responsáveis pelo processo de deformação, como a possibilidade de novos sistemas de deslizamento e a deformação localizada ao longo dos contornos de grãos. Dependendo das condições ambientais que o material está submetido, como por exemplo, meios agressivos, que podem exercer uma forte influência no comportamento da grande maioria das ligas, principalmente quando relacionada com processos que envolvem instabilidade metalúrgica, conduzindo um componente estrutural a uma possível falha.

### 3.2 Mecanismos de Fluência

O mecanismo de fluência está relacionado com o movimento das discordâncias. As baixas temperaturas o movimento das discordâncias não avança, pois são interrompidas pelos contornos de grãos ou pelas impurezas. Entretanto a temperaturas mais elevadas as discordâncias avançam de um plano para outro ou acabam desaparecendo devido aos movimentos atômicos. Com a movimentação dos átomos e dos vazios na vizinhança da discordância, a mesma discordância pode saltar do plano de escorregamento inicial e assim permitir a continuidade da deformação, ou seja, a fluência, conforme mostra a figura 1 (VAN VLACK, 1970).

**Figura 1 - Salto de Discordâncias.**



**Fonte: (Van Vlack, 1970)**

Segundo Van Vlack (1970), o contorno de grão possui um papel importante no movimento das discordâncias, pois conforme se aumenta a temperatura o contorno de grão acaba invertendo de função e ao invés de agir de forma a restringir as discordâncias ele passa a auxiliá-la. A temperatura de inversão é definida como temperatura equicoesiva (TEC), e essa temperatura é proporcionalmente aumentada conforme o aumento da temperatura de fusão da liga.

#### 3.2.1 Mecanismos de Deformação em Fluência

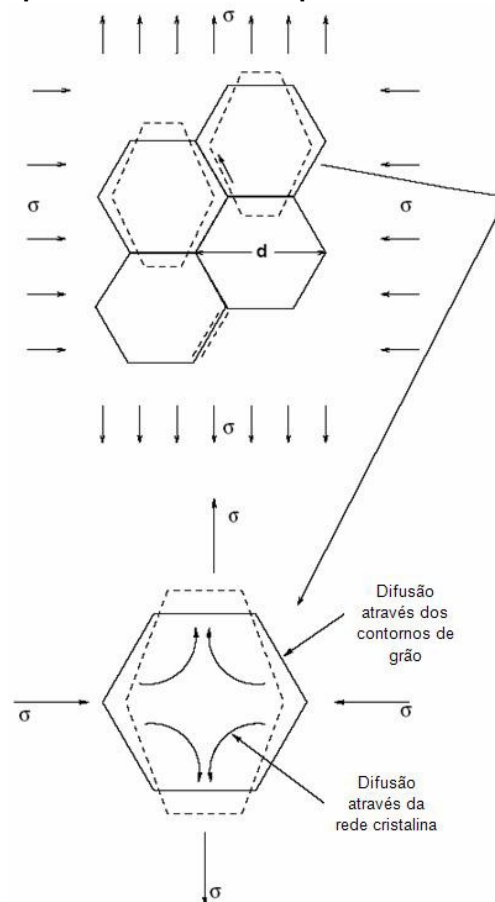
Considera-se que os principais mecanismos de deformação por fluência são: fluência devida ao deslizamento (escorregamento) das deslocações, fluência decorrente do escorregamento e ascensão das deslocações, fluência por difusão e fluência por escorregamento dos limites de grão (GOBBI).

- Transporte de átomos por difusão;
- Escalagem e deslizamento de discordâncias
- Deslizamento de contornos de grão.

### 3.2.1.1 Transporte de Átomos por Difusão

Segundo Gobbi (2013) é o mecanismo resultante do movimento de defeitos pontuais orientados pelo campo de tensões sem envolver diretamente o movimento de discordâncias. Mecanismo dominante em tensões mais baixas e altas temperaturas. Tratando-se de um processo termicamente ativado, que pode resultar em um fluxo de átomos de uma região comprimida para uma região tracionada, como na figura 2.

**Figura 2 - Representação esquemática da fluência por difusão em uma microestrutura de grãos**



**Fonte: Adaptado de Gobbi, 2013**

Na fluência por difusão, o fluxo de átomos é imaginado como ocorrendo dos locais com região de tensão compressiva para locais de regiões de tensão trativa, balanceado por um contra fluxo de vacâncias na direção oposta. Nenhum movimento de deslizamento é imaginado. Nesta forma de fluência, as taxas de fluência no estado estacionário são admitidas como variando linearmente com a tensão. Para baixas tensões, a fluência por difusão vai ocorrer somente se as temperaturas estiverem muito altas, chegando próximas do ponto de fusão do material, portanto, geralmente não são tão significativas para a engenharia (Pacheco, 2001).

Quando os materiais são submetidos a baixas tensões com taxa de deformação extremamente lenta, a deformação plástica ocorre pelo processo de difusão termicamente ativado e caracterizado pela migração de vacâncias do contorno de grão que se encontra normal ao eixo da tensão para o contorno de grão paralelo ao eixo da tensão (REIS, 2005).

De acordo com Reis (2005), uma análise dos principais mecanismos pode ser discutida de forma mais prática através da utilização da equação 01, que relaciona a taxa de deformação, como uma função da tensão aplicada, e da temperatura absoluta T:

$$\dot{\epsilon}_s = A \frac{DGb}{KT} \left(\frac{b}{d}\right)^p \left(\frac{\sigma}{G}\right)^n \quad (\text{Equação 1})$$

Sendo o coeficiente de difusão D relacionado com a temperatura T pela Equação 02.

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q_c}{RT}\right) \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

A = Constante adimensional;

$D_0$  = Difusividade;

G = módulo de elasticidade transversal;

b = Vetores de Burges;

k = Constante de Boltzman;

$Q_c$  = Energia de ativação para fluência;

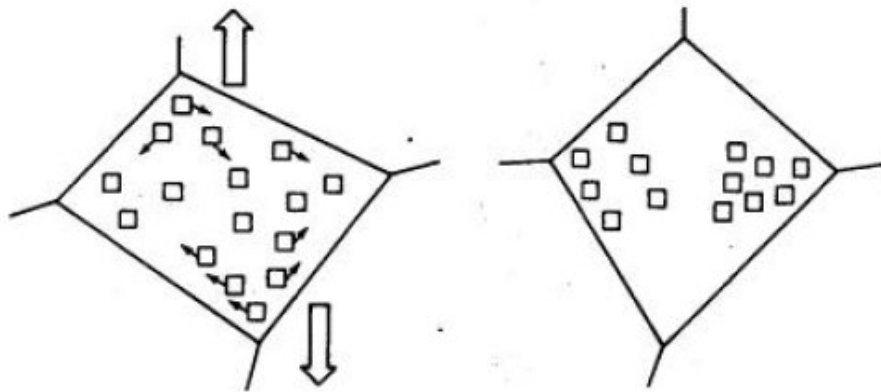
R = Constante universal dos gases;

d = Tamanho médio do grão;

Ainda segundo Reis (2005) as constantes  $p$  e  $n$  contribuem para a distinção entre os mecanismos que dependem de atividades intragranulares ou intergranulares. Dois mecanismos são considerados importantes nesta região:

- A deformação que ocorre nos materiais policristalinos através do fluxo de vacâncias sob tensão direcionada pode ocorrer em altas temperaturas ( $T > 0,7 T_f$ ), conhecida como fluência de Nabarro- Herring ou em baixas temperaturas ( $0,4 < T < 0,7 T_f$ ) conhecida por fluência de Coble;
- O mecanismo proposto por Nabarro e Herring, que resulta da difusão de vazios entre regiões sobre os contornos condicionados a diferentes estados de tensão, cujo fluxo ocorre através do volume da rede cristalina, pelo interior dos grãos, alongando-os na direção da tensão aplicada.

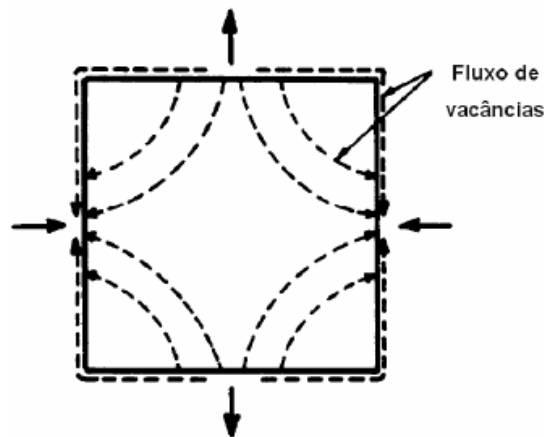
**Figura 3 - Fluxo de vazios resultando em aumento de comprimento de grão**



**Fonte: Dieter, 1988**

Outro mecanismo é o de Coble, que envolve a difusão pelos contornos de grão ao invés da rede cristalina. Esta difusão resulta no deslizamento dos contornos de grãos. Um modo prático de se obter uma liga com elevada resistência à fluência de Nabarro- Herring e Coble é aumentando seu tamanho de grão. Estes mecanismos são apresentados através da figura 04.

Figura 4 - Fluxo de vacâncias através do volume do grão (Nabarro-Herring) ou ao longo do contorno de grão (Coble)



Fonte: Reis, 2005

Para o mecanismo proposto por Coble, a deformação resulta do processo de difusão, cuja trajetória preferencial situa-se ao longo dos contornos de grão. A taxa de fluência estacionária pode ser representada pela Equação 03.

$$\dot{\epsilon} = \frac{AD_{cg}Gb}{KT} \left(\frac{b}{d}\right)^3 \left(\frac{\sigma}{G}\right) \quad (\text{Equação 3})$$

Onde,  $D_{cg}$  é o coeficiente de difusão ao longo dos contornos de grão.

O mecanismo proposto por Coble pode atuar simultaneamente com o de Nabarro-Herring, e sua taxa de fluência resultante correspondem à soma das contribuições. O mecanismo de Nabarro-Herring predomina em condições de temperaturas elevadas e metais com granulação grosseira enquanto que o mecanismo de Coble predomina preferencialmente em temperaturas baixas e materiais com granulação fina (Gobbi).

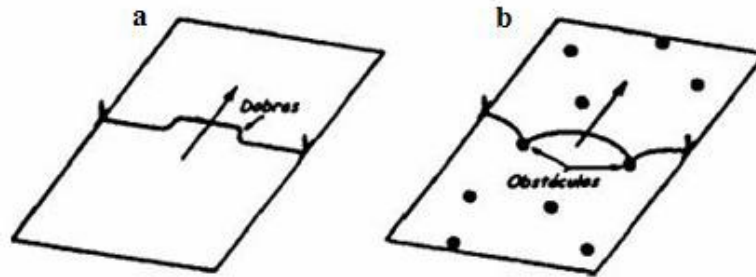
### 3.2.1.2 Deformação por Deslizamento e Escalagem de Discordâncias

Em condições de baixa temperatura, o controle da deformação por fluência ocorre através do processo de deslizamento de discordâncias em seus planos preferenciais. O mecanismo predominante inclui superação da barreira de Peierls, através do qual as vibrações térmicas eventualmente favorecem o movimento de um segmento de discordância por um vetor de Burgers, nucleando e propagando, com



certa facilidade, uma dobra dupla sob ação da tensão aplicada e conseqüentemente, provocando o cisalhamento do cristal, ao passo que barreiras como precipitados são superadas por anéis de discordâncias (Reed-Hill, 1982).

**Figura 5 - Deslizamento de discordâncias em baixas temperaturas. a) Superação da barreira de Peierls; b) Interação entre as partículas de precipitado**



Fonte: Reis, 2005.

A energia térmica ajuda a tensão na formação de uma dobra, que depois se estende sob a ação da tensão. Uma discordância move-se de uma maneira gradativa, em degraus. A força que retém uma discordância na sua posição de menor energia no reticulado é chamada de força de Peierls. Em altas temperaturas, a difusão é suficientemente rápida, onde as vacâncias alcançam as extremidades das discordâncias promovendo o fenômeno da escalagem. As discordâncias são emitidas de uma série de fontes, colocadas sobre diferentes planos de deslizamento. Embora as discordâncias em hélice de sinal oposto possam aniquilar-se, o movimento das discordâncias em cunha de duas fontes adjacentes é rapidamente bloqueado devido à existência da interação mútua. Desta maneira, as discordâncias empilham-se sobre o plano de deslizamento no qual as principais se decompõem em grupos de discordâncias com dipolos. A taxa de emissão de discordâncias pelas fontes é controlada pela taxa de remoção do empilhamento conforme elas escalam e aniquilam-se umas com as outras (Perez, 2004).

A escalagem de discordâncias é um processo de recuperação onde o material deformado é considerado contendo um número de fontes de discordâncias. Durante a fluência, estas fontes emitem discordâncias que se movem ao longo de seus planos de deslizamento até que as discordâncias sejam presas em obstáculos, formando um empilhamento. Este processo constitui um endurecimento de fase. A discordância líder irá então passar por este plano de deslizamento. Esta escalagem de discordância pode ser aniquilada através do encontro com outra discordância com sinal oposto, ou após alguma distância da escalagem pode estar livre para deslizar

em um novo plano de deslizamento até o encontro de outro obstáculo. O processo de escalagem representa a recuperação da estrutura do material (Dieter, 1988).

As discordâncias são criadas num metal durante o processo de deformação plástica. Como é necessário trabalho para formar um anel de discordâncias em qualquer tipo de fonte, é possível que a energia térmica possa ajudar uma tensão aplicada a vencer essa barreira energética. A importância desse efeito ainda não está comprovada, mas atualmente parece que a maioria das discordâncias se nucleia heterogeneamente em partículas de impurezas. Neste caso, o efeito da energia térmica seria difícil de ser avaliado (Reis, 2005).

Como a fluência ocorre em temperaturas altas, a geração e a movimentação da discordância resultam na deformação de endurecimento, enquanto que processos de recuperação, como a escalagem e deslizamento cruzado, permitem que discordâncias também possam ser anuladas ou rearranjadas em condições de baixa energia (GOBBI, 2013).

### 3.2.1.3 Escorregamento dos Contornos de Grãos

Neste mecanismo, o processo de deformação ocorre com a movimentação relativa entre grãos de um metal policristalino, através da ação de um componente cisalhante de tensão atuando de forma descontínua e irregular, tornando-se mais efetivo com o aumento da temperatura e redução da taxa de deformação (Barboza, 2001).

Na deformação plástica em metais policristalinos, a maior distorção ocorre em regiões adjacentes aos contornos devido aos mecanismos comuns de recuperação, de maneira que o deslizamento de contornos é considerado como resultado da ação combinada do movimento de discordâncias e mecanismos de fluência por difusão (REIS, 2005).

O papel mais importante desempenhado pelo deslizamento dos contornos de grão está relacionado com o início da fratura intergranular. Para que ocorra deformação nos contornos de grão sem que haja formação de trincas, deve existir um mecanismo de deformação que permita a continuidade da deformação ao longo do contorno de grão. Uma maneira de acomodar a deformação nos contornos de grão

em temperaturas altas é através da formação de dobras no final de um contorno de grão que correspondem a uma alteração da superfície à frente do contorno deslizado (Gobbi, 2013).

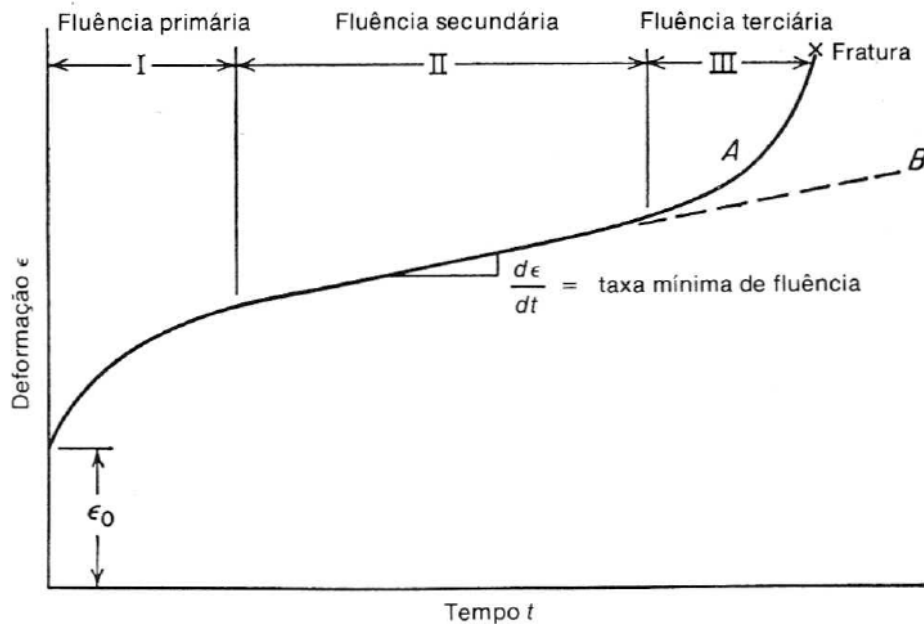
As propriedades de fluência de materiais cristalinos dependem criticamente do deslizamento e escalagem de discordâncias. As discordâncias exercem um importante papel na deformação plástica de materiais cristalinos em todas as temperaturas. Em baixas temperaturas, a plasticidade é atingida pelo deslocamento de discordâncias; entretanto, em altas temperaturas, sob condições de fluência, tem-se o deslocamento e a escalagem de discordâncias (Reis, 2005).

Neste processo de fluência, os grãos conservam sua forma original (não exibem alongação) de modo que sob deformações muito altas, há um aumento do número total de grãos orientados ao longo do eixo trativo. Este comportamento ocorre com materiais que possuem granulação grosseira submetidos a altas temperaturas (Oliveira, 2010).

### 3.3 Curvas de Fluência

Para se determinar a curva de fluência em um material, aplica-se a um corpo-de-prova de tração uma carga constante e uma temperatura constante e verifica-se sua deformação em função do tempo (DIETER, 1981), conforme mostrado na figura 06.

**Figura 6 - Curva típica de fluência mostrando os três estágios do processo. Curva A, ensaio de carga constante; Curva B, ensaio de tensão constante.**



**Fonte: Dieter, 1981**

Segundo Dieter (1981) a curva A representada na figura 06, ilustra a forma idealizada da curva de fluência, onde pode notar que após uma alongação inicial rápida a taxa de fluência passa a diminuir com o tempo atingindo um estado de equilíbrio, onde sua variação com o tempo passa a ser muito pequena. Após este processo finalmente ocorre o crescimento rápido da taxa de fluência em função do tempo levando a fratura do corpo de prova. E isto mostra que este estágio possui forte relação com os três estágios da fluência mostrados acima, mas também nota-se que a perfeita distinção entre os estágios depende fortemente da tensão aplicada e da temperatura.

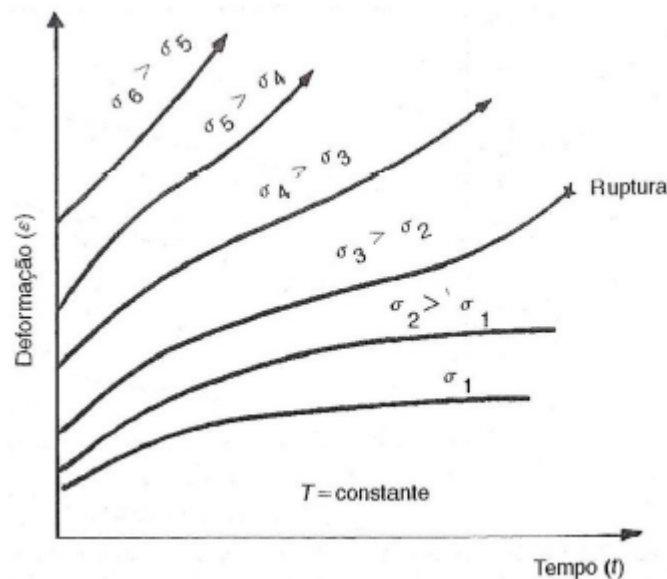
Ainda segundo Dieter (1891) é comum para adotar nos ensaios de fluência manter a carga constante ao longo de todo o ensaio, para o levantamento da curva, pois a medida que o corpo de prova alonga e por consequência tem sua área de secção transversal diminuída, a tensão axial aumenta. O valor anunciado da tensão de ensaio é na verdade o valor da tensão inicial aplicada ao corpo de prova. Nos ensaios feitos sob tensão constante não é possível observar a região de taxa de fluência acelerada, denominada de região três do ensaio, gerando assim uma curva similar a curva B representada na figura 06, isso considerando que o corpo de prova

não venha a sofrer variações metalúrgicas, por que se isto ocorrer, dependendo do material, será sim possível observar a fluência acelerada neste ensaio.

Segundo Garcia (2008) os principais mecanismos de deformação observados em elevadas temperaturas consistem em movimentos de discordâncias, recristalização e escorregamento de contornos de grãos, sendo que o primeiro e o último estágio são favorecidos com o aumento da temperatura.

Ainda segundo Garcia (2008) pode se observar, na representação das curvas da figura 07, a influência do valor da tensão aplicada no ensaio a temperatura constante.

**Figura 7 - Representação do efeito da tensão nas curvas de fluência à temperatura constante**



**Fonte: Garcia, 2008**

Conforme Dieter (1891) uma curva de fluência possuindo os três estágios bem definidos só será verificada para certas combinações de tensão e temperatura. Verifica-se também que mantendo a tensão constante e variando a temperatura, as curvas acabam se tornando semelhantes.

### 3.3.1 Estágio 1

A fluência primária ou também denominada como estágio primário da curva de ensaio pode ser caracterizada como um decréscimo contínuo da taxa de fluência, isto significa que a inclinação da curva diminui com o tempo. Isto ocorre devido à um aumento da resistência a fluência que o material adquire devido ao encruamento que o mesmo sofre, e por consequência a deformação plástica torna-se mais difícil (GARCIA, 2008).

Segundo Souza (1982) devido ao encruamento existente ocorre um decréscimo da velocidade de fluência no material, dificultando o prosseguimento do ensaio durante o primeiro estágio, desta forma o escorregamento das discordâncias deve ser impedido por barreiras que surgem no decorrer do tempo. Portanto, ao se aplicar uma tensão no material a uma dada temperatura ocorre um impedimento das discordâncias escorregarem através de pequenas barreiras, que serão vencidas somente através de uma ativação térmica, mas isto somente até o surgimento de novas barreiras maiores que serão vencidas após tempos mais longos de ensaio.

### 3.3.2 Estágio 2

Segundo Garcia (2008) o estágio secundário, ou fluência secundária, a taxa de fluência e dada de forma constante e a curva passa a apresentar característica linear devido a dois fatores que promovem um equilíbrio entre dois fenômenos atuantes e competitivos, que são encruamento e recuperação. O valor médio da taxa de fluência neste estágio é denominado de taxa mínima de fluência.

Neste estágio, o processo de recuperação suficientemente rápido para contrabalancear o encruamento. Esta recuperação caracteriza a liberação de discordâncias das barreiras (florestas ou empilhamento de discordâncias, precipitados) por meio de ascensão. A ascensão depende de uma maior energia de ativação e portanto passa a ser o processo controlador da velocidade de fluência, e por depender da temperatura, quanto maior for a temperatura maior será a recuperação, tornando o estágio secundário menos estacionário (SOUZA, 1982).

Segundo Souza (1982) com o aumento da deformação, ocorre o aumento da densidade de discordâncias (encruamento), mas estas discordâncias tendem a se aniquilarem (recuperação) ou se agrupar para formação de contornos de grãos com pequenos ângulos (poligonização), resultando em barreiras a movimentação das discordâncias (encruamento). A ascensão das discordâncias é feita por absorção e emissão de lacunas e a energia de ativação necessária para este processo é denominada de difusão de lacunas, pois quanto maior for essa energia mas o material se torna resistente a fluência, por que para acontecer a ascensão será necessário vencer uma barreira energética maior.

### 3.3.3 Estágio 3

Neste estágio ocorre uma aceleração da taxa de fluência no material, que termina com o a sua ruptura. Este estágio é irrelevante na medida em que se trabalha com ensaios envolvendo cargas e/ou temperaturas elevadas. Neste estágio tem início o processo interno da fratura, mencionando ainda a separação dos contornos de grãos, a formação, o coalescimento e a propagação de trincas, provocando uma redução localizada da área e a um conseqüente aumento na taxa de deformação (GARCIA, 2008).

Segundo Souza (1982) este estágio é caracterizado por uma grande movimentação das discordâncias e se observa a nítida formação de microtrincas no material. Essas microtrincas são originadas pela deformação localizada nos contornos de grão, ocasionando fratura intercrystalina. Um material submetido a altas tensões e temperaturas mais baixas formam pontos triplos, que consiste no encontro de três contornos de grão. As trincas são originadas pelo deslizamento destes contornos de grão que provocam tensões diversas e suficientemente altas. Analisando o caso contrário, onde o material ou corpo-de-prova está sujeito a tensões baixas e temperaturas mais elevadas formam-se pequenos poros nos contornos de grão na direção normal a tensão, que crescem e coalescem devido a concentração de lacunas.

### 3.4 ENSAIOS DE FLUÊNCIA

#### 3.4.1 Ensaio de Fluência a Tensão e Força Constante

Segundo Souza (1982) para se determinar a curva de fluência de um metal, aplica-se ao corpo de prova uma carga inicial, que é mantida constante durante todo o ensaio, a uma temperatura também constante. A duração de cada ensaio varia muito com o material a ser ensaiado, mas estes ensaios duram cerca de 42 dias aproximadamente 1 000 horas.

Um ensaio típico de fluência consiste em submeter um corpo de prova a uma carga ou tensão constante. A deformação é medida e plotada como uma função do tempo decorrido. A maioria dos ensaios é do tipo carga constante, que fornece informações de uma natureza que pode ser melhor caracterizada na Engenharia. Em contrapartida, os ensaios com tensão constante são empregados para proporcionar uma melhor compreensão dos mecanismos de fluência (Dieter, 1891).

As curvas obtidas nos ensaios normais de fluência podem não conter todos os três estágios por isso em temperaturas relativamente altas, a curva pode obter uma velocidade de fluência de forma não constante desde o início do segundo estágio ou até mesmo desde o primeiro estágio. O terceiro estágio, quando atingido, pode não existir como da forma apresentada, se tratando de materiais mais frágeis. As alterações estruturais e superficiais no material durante o ensaio podem acarretar em curvas distintas das consideradas ideais. Por outro lado os ensaios com tensões muito altas alteram a extensão dos estágios e os ensaios com tensões e temperaturas muito baixas necessitam de um tempo muito longo para se atingir o terceiro estágio. O terceiro estágio geralmente é atingido através de tensões e temperaturas muito altas (Eulotério, 2009).



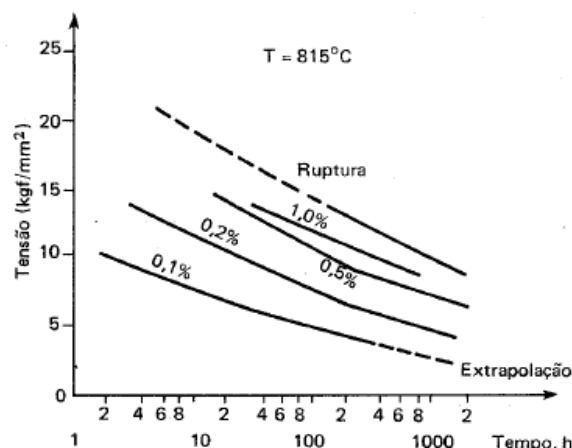
### 3.4.2 Ensaio de Ruptura por Fluência

Este ensaio ocorre de maneira semelhante ao ensaio de fluência, contendo como característica principal que os corpos de prova são sempre levados a ruptura. Como o ensaio tenderia a ser mais demorado que o de fluência normal, a proposta foi abreviar o ensaio utilizando-se cargas maiores, ocasionando em taxas de fluência maiores. Com tudo a deformação dos corpos de prova também são maiores, podendo chegar em até cinquenta por cento de alongamento. Com estes ajustes em relação ao primeiro ensaio, tem se uma diminuição no número de horas do ensaio, este podendo durar cerca de 1000 horas (SOUZA, 1982)

O principal objetivo deste ensaio é a determinação do tempo necessário para causar ruptura do material a uma dada tensão nominal e uma temperatura constante. O equipamento para o ensaio de ruptura por fluência é mais simples de construir, manter e operar do que o ensaio de fluência (DIETER, 1891).

Segundo Souza (1982), os gráficos geralmente são da carga aplicada nos vários ensaios em função do tempo de ruptura, obtendo-se uma linha reta que pode mudar sua inclinação, quando ocorrerem mudanças estruturais, tais como oxidação, recristalização, crescimento de grão, mudanças do tipo de fratura (transgranular ou intergranular). Para se fazer extrapolações é muito importante conhecer essas mudanças estruturais. Um exemplo de gráfico gerado pelo ensaio de ruptura por fluência está representado na figura 08.

**Figura 8 - Curva tensão-log tempo para aço autêntico de baixo carbono, forjado pelo ensaio de fluência e ruptura por fluência.**



Fonte: Souza, Sérgio de – Ensaos mecânicos de materiais Metálicos (1982)

### 3.4.3 Ensaio de Relaxação

Segundo Souza (pág. 1982) este ensaio tem como objetivo medir a redução da carga (tensão) aplicada a um corpo de prova com o tempo, quando a deformação é mantida constante a uma dada temperatura.

### 3.5 Métodos de Extrapolação

As técnicas de extrapolar resultados de ensaios de fluência permitem o conhecimento do comportamento dos materiais a longo prazo a partir dos resultados de ensaios efetuados em tempos inferiores. Para se obter as características de comportamento dos materiais sujeitos à fluência, teria de se efetuar ensaios que contemplassem a vida útil do equipamento levando em consideração as condições de serviço, o que torna estes ensaios inviáveis para a maioria dos casos. Para superar esta dificuldade, recorre-se à utilização de parâmetros adimensionais que estabelecem uma relação tempo e temperatura permitindo assim a extrapolação de tempos de ruptura por fluência. Estes parâmetros baseiam-se no princípio de que é possível substituir condições de fluência a uma dada temperatura e tempo de ruptura por um ensaio efetuado num tempo inferior mas com uma temperatura superior. Existem várias formas de se extrapolar os resultados mas as mais conhecidas são (Cardoso 2009):

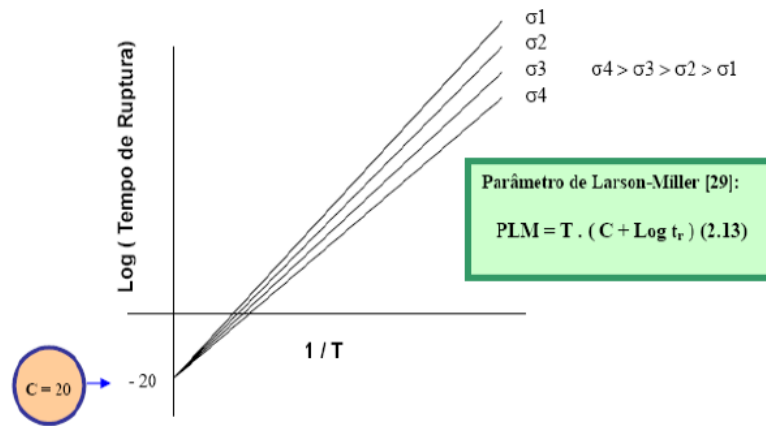
- Parâmetro de Larson-Miller;
- Parâmetro de Manson-Hafered;

A seguir apresentam-se as características de cada método.

- Parâmetro de Larson-Miller:

Este método considera que os dados de iso-tensão são linhas retas que convergem para um ponto focal situado na região negativa do eixo  $\log(tr)$ , como mostrado na figura 09.

Figura 9 - Padrão das linhas de iso-tensão no espaço  $\log(tr) \times 1/T$

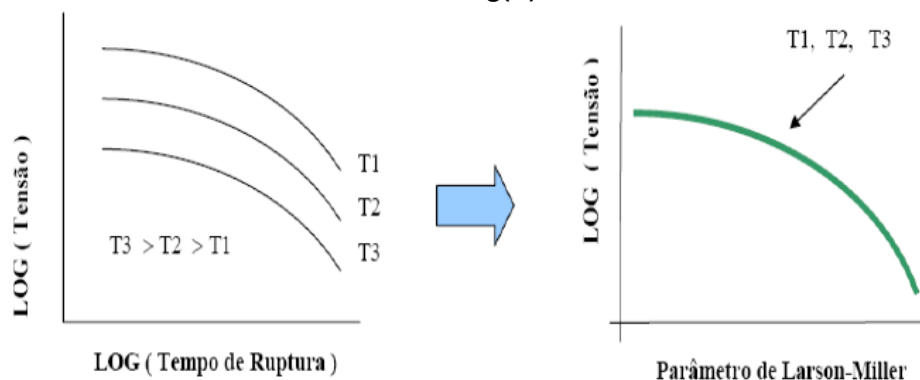


Fonte: Santos, 2007

Em geral o valor de C é próximo a 20, mas pode variar de acordo com o material analisado.

Ainda segundo Santos (2007) o uso do Parametro de Larson-Miller (PLM) no lugar de  $\text{Log}(tr)$ , faz com que as curvas de  $\text{Log}(\sigma) \times \text{Log}(tr)$  que ficam separadas, se encontrem em uma mesma curva de referência, como mostrado 10.

Figura 10 - Conversão de uma família de dados  $\text{Log}(\sigma) \times \text{Log}(tr)$  em uma única curva de referência  $\text{Log}(\sigma) \times \text{PLM}$



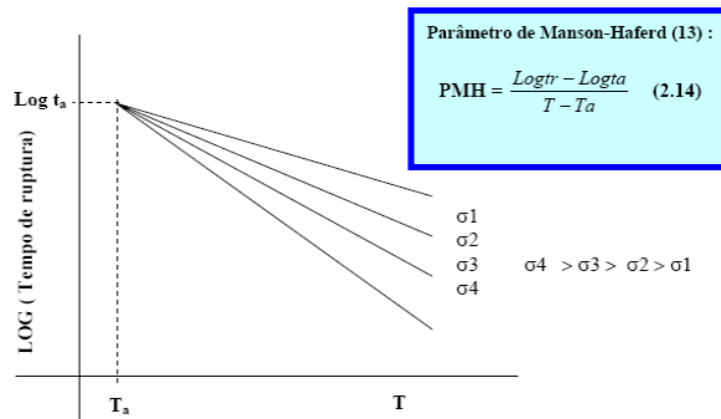
Fonte: Santos, 2007

Nota-se que a curva paramétrica apresenta muito mais recursos para a interpolação e extrapolação de dados do que a curva  $\text{Log}(\sigma) \times \text{Log}(tr)$  levantada em cada nível de temperatura (Santos 2007).

- Parâmetro de Manson-Haferd:

Este método considera que os dados de iso-tensão são linhas retas que convergem para um ponto focal com coordenadas  $[T_a, \text{Log}(t_a)]$ , como mostrado na figura 11.

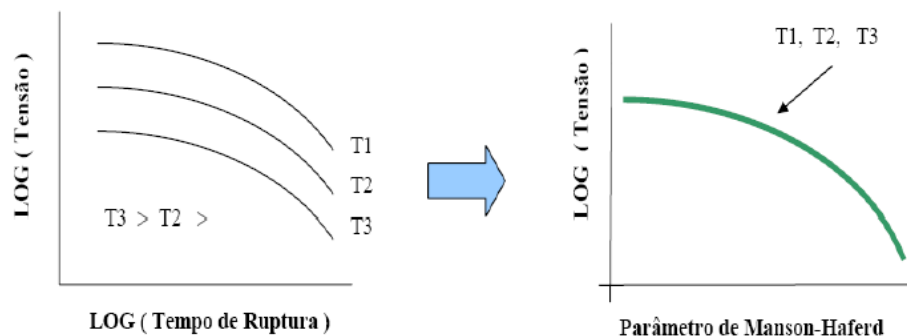
Figura 11 - Padrão das linhas de iso-tensão no espaço  $\text{log}(tr) \times T$



Fonte: Santos, 2007

O uso do PMH no lugar de  $\text{Log}(tr)$  faz com que as curvas de  $\text{Log}(\sigma) \times \text{Log}(tr)$  que ficam separadas, também se encontrem em uma mesma curva de referência, como mostrado na figura 12.

Figura 12 - Conversão de uma família de dados  $\text{Log}(\sigma) \times \text{Log}(tr)$  em uma única curva de referência  $\text{Log}(\sigma) \times P$ , segundo o método de Manson-Haferd



Fonte: Santos, 2007

Segundo Garcia (2008), os resultados dos ensaios são apresentados em formato log-log, que seria o logarítmico da tensão versus o logarítmico do tempo de

ruptura, resultando em uma linha reta. Um dos parâmetros mais importantes no ensaio, é a taxa mínima de fluência, que consiste na inclinação da curva do estágio secundário de fluência.

Conforme Dieter, (1981) foram desenvolvidas relações experimentais englobando a taxa mínima de fluência, na qual pode-se relacionar tanto com a tensão quanto com a temperatura. Para o caso de dependência de  $\dot{\epsilon}_m$ , com a tensão  $\sigma$ , a relação é:

$$\dot{\epsilon}_m = K_1 * \sigma^{n_1} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

$K_1$  e  $n_1$  são constantes

Em função da impraticabilidade de se realizar ensaios de longa duração, se adota uma maneira de avaliar devidos materiais que tem por características de projeto possuir uma vida útil extremamente longa, que consiste em avaliar a fluência nas condições de temperatura acima das especificadas, por tempos mais curtos, mas mantendo o mesmo nível de tensão. O procedimento mais comum de extrapolação de resultados é empregado pelo método de Larson-Miller, como mostrado na equação 05 (DIETER, 1988):

$$T * (C + \log_{tr}) = \text{Constante} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

C = Constante de Larson-Miller (ordem de 20);

T = Temperatura do ensaio (K)

Tr = Tempo de ruptura (h)

A extrapolação de resultados obtidos através de ensaios mais curtos, para que se possa estimar a deformação esperada para longos intervalos de tempo, considerando-se uma tensão e uma temperatura constantes. Em qualquer ponto dentro da região de inclinação constante, a deformação por fluência total é dada pela equação 06.

$$\epsilon = \epsilon_0 + \epsilon' * t \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

$\epsilon_0$  = interseção da extrapolação da reta do segundo estágio

$\epsilon'$  = inclinação da linha

t = tempo

A relação acima é admitida quando o segundo estágio de fluência dure o tempo da vida esperada do material. Para tempos mais longos de utilização, uma extrapolação segura das curvas de fluência só pode ser feita se houver certeza de que não ocorram mudanças estruturais do material que resultem na variação da inclinação da curva na região da extrapolação (DIETER, 1981).

Para se obter tempos mais curtos de ruptura, normalmente os testes são realizados em temperaturas muito mais elevadas do que as temperaturas de operação e com tensões praticamente inalteradas.

Como as variações estruturais ocorrem geralmente em tempos mais curtos para temperaturas maiores, uma maneira de verificar este fato é examinar o gráfico log-log tensão versus tempo para ruptura a uma temperatura de algumas centenas de graus superior à temperatura em questão. Por exemplo, se em 1.000 h não ocorre mudança da inclinação da curva a uma temperatura 1000C superior à temperatura requerida, provavelmente pode-se extrapolar com segurança a curva na temperatura inferior, como uma linha reta, até 10.000 h, e mesmo a extrapolação até 100.000 h pode ser possível (DIETER, 1988).

Embora os métodos que utilizam o emprego destes parâmetros deem mais ênfase à determinação do tempo para a ruptura, estas técnicas podem ser também utilizadas com os dados de fluência empregando-se o tempo necessário para atingir uma certa deformação. Larson e Miller mostraram que os dados experimentais de ruptura por fluência comportam-se de acordo como mencionado (DIETER, 1981).

**Figura 13 - Relação entre ensaio e tempo de serviço**

<i>Condições de operação</i>	<i>Condições de ensaio de Larson-Miller</i>
10.000 h a 1.000°F	13 h a 1.200°F
1.000 h a 1.200°F	12 h a 1.350°F
1.000 h a 1.350°F	17 h a 1.500°F

Fonte: DIETER, 1981

### 3.6 Ensaio de Tração à Quente

As propriedades mecânicas mais importantes para o aço é a sua resistência à tração e o limite de escoamento. Elas estão relacionadas com a propriedade de ductilidade do material, onde o material pode sofrer grandes deformações antes de se romper. Quando o aço é submetido a uma força de tração, ele passa por três estados sucessivos que podem ser observados na curva tensão-deformação: o elástico, o plástico e a sua ruptura (KAWAKAMI, 2011).

No estágio elástico, o aço se alonga quando sofre uma deformação e este alongamento é proporcional à força de tração e quando esta força cessa, o aço retorna ao seu tamanho original. As deformações podem ser determinadas a partir da lei de Hooke. Quando o limite de escoamento é atingido, o aço passa para o estágio plástico (KAWAKAMI, 2011).

No estágio plástico, quando aumenta a força aplicada, observa-se que uma parte do material não consegue retornar ao seu tamanho original. Entra-se então na deformação plástica do aço. A medida que se aumenta mais a carga aplicada ao aço, mais próximo está do seu domínio de ruptura. Este domínio é caracterizado pela deformação em uma zona local, chamado de zona de estricção, que é o último estágio antes do rompimento do material (KAWAKAMI, 2011).

#### 3.6.1 Curva Tensão e Deformação

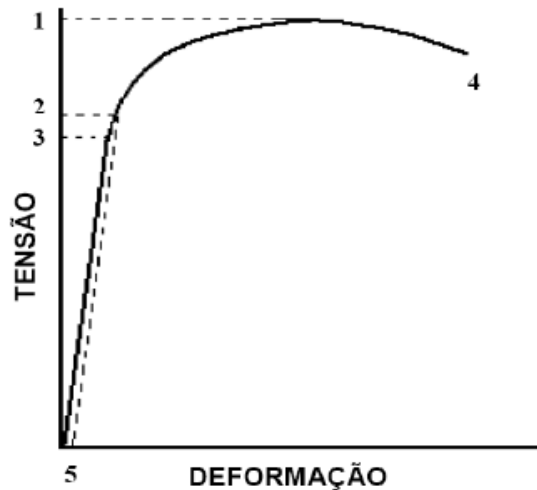
Os ensaios de tração são amplamente utilizados visando a obtenção de informações básicas sobre o comportamento mecânico de um material.

Neste tipo de curva, na região elástica, a tensão é proporcional a deformação valendo assim a lei de Hooke (Santos, 2007).

Após a região elástica, tem-se a região de plasticidade não uniforme que ocorre quando uma tensão suficientemente alta libera algumas discordâncias que se encontram ancoradas por átomos de soluto. Quando a carga ultrapassa a região de escoamento, o material sofre deformação plástica generalizada uniforme. Nessa região, para que se possa ter uma maior deformação plástica é necessário aumentar

a tensão. Isso ocorre em razão do fenômeno de encruamento que se intensifica no material (Santos, 2007).

**Figura 14 - Curva Convencional Tensão-Deformação típica de um ensaio de tração.**



Fonte: Dias, 2010

Ainda segundo Dias (2007), a tensão e a deformação convencional são dadas pelas equações 7 e 8 respectivamente.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (\text{Equação 7})$$

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (\text{Equação 8})$$

Onde:  $\sigma$  é a tensão (Mpa);  $F$  a carga aplicada (N);  $A_0$  = área inicial da secção transversal ( $\text{mm}^2$ );  $\varepsilon$  = Deformação (adimensional);  $l_0$  = Comprimento inicial (mm);  $l$  = Comprimento variável (mm);

Para Santos (2007), muitos materiais metálicos tracionados possuindo baixos níveis de tensão (no regime elástico), a tensão e a deformação são linearmente proporcionais e relacionados pela lei de Hooke, equação 9.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (\text{Equação 9})$$

Onde  $E$  = módulo de elasticidade ou módulo de Young (GPa);



Abaixo podemos relacionar as tensões verdadeiras com as tensões convencionais, sendo expressada pelas equações 10 e 11 respectivamente.

$$\varepsilon_v = \ln(1 + \varepsilon) \quad (\text{Equação 10})$$

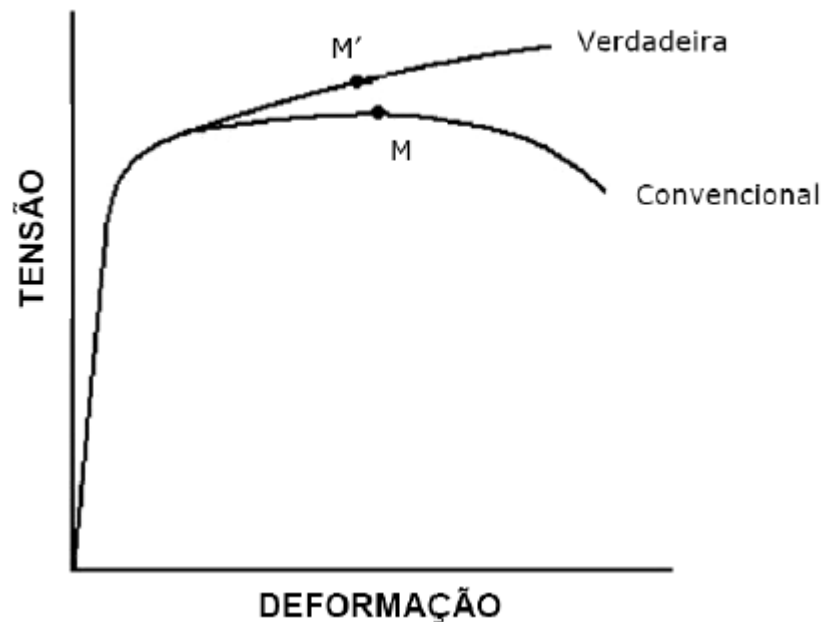
E

$$\sigma_v = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (\text{Equação 11})$$

Onde  $\varepsilon_v$  e  $\sigma_v$  são deformação e tensão verdadeiras.

Na figura 15 são relacionadas as curvas convencionais e verdadeiras.

**Figura 15 - Comparação entre as curvas tensão-deformação verdadeira e convencional**



Fonte: Dias, 2010

### 3.7 Relação entre Tração a Quente e Fluência

A relação que se estabelece entre um teste de tração a quente e fluência pode ser estabelecida considerando que, durante um ensaio de tração, a temperatura e a taxa de deformação são arbitrariamente fixadas para se obter as características

da tensão do material, enquanto que, durante um teste de fluência, a temperatura e a tensão são arbitrariamente fixadas para obter a história da taxa de deformação do material. (DIAS, 2010).

Com o intuito de avaliar o desempenho de um material em fluência, diversas relações paramétricas foram desenvolvidas. O parâmetro de Larson-Miller (PLM) é frequentemente empregado para prever o tempo de vida de ligas metálicas sob tensão, em diferentes condições de tempo e temperatura. Pode-se através da expressão de PLM, mostrada através da equação 12, obter curvas para o estudo do comportamento do material em fluência. Diferentes valores da constante C são empregados, variando usualmente entre 10 a 40, para diferentes ligas metálicas (Lemos George, 2015).

$$PLM = T(C + \log t) \quad (\text{Equação 12})$$

Para prever o comportamento do material em fluência a partir de ensaios de tração a quente, foi realizado um estudo por Bueno e Sobrinho (2012) com diversas ligas. Estes ensaios possuem curta duração, levando entre minutos e horas para serem completados, em contraste com períodos que vão de semanas a meses para os testes de fluência. Para que a equivalência fosse possível, foram elaborados critérios onde são considerados o limite de resistência, o tempo necessário para que o mesmo ocorra no ensaio de tração, e a taxa de deformação total definidos a seguir (Lemos George, 2015):

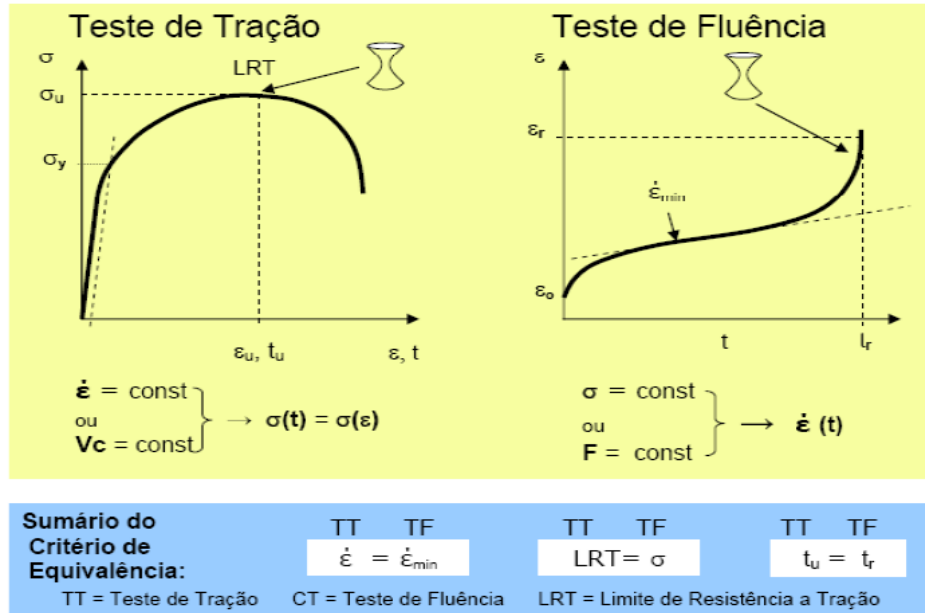
- A taxa de deformação empregada no ensaio de tração equivale à taxa mínima de deformação em fluência;
- O limite de resistência obtido no teste de tração é equivalente à tensão aplicada no ensaio de fluência;
- O tempo necessário para ocorrer a tensão máxima no ensaio de tração equivale ao tempo de ruptura nos testes de fluência.

A figura 16 mostra o critério de equivalência descrito acima para as curvas de tração e fluência, onde a curva tensão x deformação para o teste de tração é representada com velocidade  $V_t$ , ou taxa de deformação constante, e a curva de

fluência, deformação x tempo é obtida com carga ou tensão constante. Através destas curvas se pode obter os parâmetros de equivalência entre os ensaios (Santos, 2007).

Ainda como afirma Santos, 2007, este critério foi extensivamente testado em ensaios com o aço 2,25Cr-1Mo em seu estado virgem.

**Figura 16 - Analogia dos parâmetros envolvidos nos testes de tração a quente e fluência e seus aspectos de equivalência.**



Fonte: Santos, 2007

### 3.8 Normas de Ensaio para Fluência

Todos os ensaios tem como base uma norma na qual os ensaios são baseados e padronizados, para o ensaio de tração segue-se a norma ASTM E-8, que possui características semelhantes a norma de ensaio a tração quente a ASTM E-21. E para a realização de ensaios de fluência, se utiliza a norma ASMT E-139, na qual juntamente com a norma E-21 serviu como base para realização dos ensaios.

### 3.8.1 Temperatura de Ensaio

O controle da temperatura de ensaio é muito importante, verificou-se que pequenas variações podem causar alterações na velocidade de fluência. Na tabela 01 se tem um exemplo que caracterizam essas variações. (Souza).

**Tabela 1 - Comparação entre temperatura e deformação**

Aço	500 °C	540 °C
Duraluminio	200 °C	230 °C
Deformação por hora	$4 \times 10^{-7}$	$4 \times 10^{-5}$

**Fonte: Adaptado de Souza (1982)**

Na figura 17 aparece uma tabela mostrando três tipos de normas de ensaio distintos e suas particularidades, como, temperatura de ensaio e o intervalo de variação.

**Figura 17 - Temperatura de Ensaio e Variações Permissíveis**

<i>Norma</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Intervalo de variação</i>
ASTM – E 139 – 1970 (fluência e ruptura por fluência)	$\leq 1\,000$ $> 1\,000$	$\pm 2^\circ\text{C}$ $\pm 3^\circ\text{C}$
BS 3 500 – Partes 1, 3 e 6 (1969) (fluência, ruptura por flexão e relaxação)	$\leq 600$	$\pm 2^\circ\text{C}$ com $100\text{ h} \geq t \geq 10\text{ h}$ $\pm 3^\circ\text{C}$ com $t > 100\text{ h}$
	$800 \leq T < 600$	$\pm 2,5^\circ\text{C}$ com $100\text{ h} \leq t \leq 10\text{ h}$ $\pm 4^\circ\text{C}$ com $t > 10\text{ h}$
	$1\,000 \leq T < 600$	$\pm 3^\circ\text{C}$ com $100\text{ h} \leq t \leq 10\text{ h}$ $\pm 6^\circ\text{C}$ com $t > 100\text{ h}$
	$> 1\,000$	Conforme acordo
ISO/R 203, R 204 e R 206 (1960) (fluência e ruptura por fluência)	$\leq 600$ $800 \leq T \leq 600$ $1\,000 \leq T < 800$ $T > 1\,000$	$\pm 3^\circ\text{C}$ $\pm 4^\circ\text{C}$ $\pm 6^\circ\text{C}$ conforme acordo
ASTM – E 150 (1975) (fluência e ruptura por fluência com aquecimento rápido e tempos curtos)	$T \leq 538 (1\,000^\circ\text{F})$ $T > 538$	$\pm 5,5^\circ\text{C} (10^\circ\text{F})$ $\leq \pm 1,0\% T$

**Fonte – Souza, Sérgio Ensaios Mecânicos de Materiais Metálicos (1982)**

### 3.9 Liga de Alumínio

De acordo com Callister (2002), as ligas de alumínio apresentam características diferentes do alumínio primário, visto que suas propriedades dependem da sua composição, Microestrutura, tratamento térmico ou mecânico ao qual ele for submetido.

Devido à baixa resistência mecânica do alumínio puro, se opta por utilizá-lo ligado a outros metais, com pequeno aumento da densidade, mas as melhorias são bem significativas quanto suas características mecânicas. São utilizados ligados com o alumínio principalmente o silício, cobre, magnésio, zinco, etc. (Silva, 2014).

Ainda segundo (Silva, 2014). As ligas de alumínio são divididas em duas classes:

- Ligas trabalhadas ou conformadas (wroughtalloys) – Ligas destinadas a fabricação de produtos semi-acabados, como laminados planos (placas, chapas e folhas), laminados não planos (tarugos, barras e arames) perfis extrudados e componentes forjados, sendo essa classe responsável por 85% da produção de Alumínio.
- Ligas fundidas (castalloys) - Ligas destinadas a fabricação de componentes fundidos. Representando os outros 15% da produção mundial de alumínio.

Na figura 18 se pode observar as características de cada liga e suas aplicações.

**Figura 18 - Características das ligas de Alumínio e suas aplicações**

<b>Liga</b>	<b>Característica</b>	<b>Aplicação</b>
6060 / 6063	Média resistência mecânica Alta resistência à corrosão Boa conformabilidade Apropriada para anodização decorativa fosca	Perfis para construção civil Caixilharia em geral Tubos de irrigação Móveis Iluminação
6061	Média resistência mecânica Alta resistência à corrosão Boa conformabilidade Média usinabilidade	Estruturas Construção Naval Veículos Indústria Moveleira Rebites
6261 / 6005A	Boa resistência mecânica Boa resistência à corrosão Boa conformabilidade Média usinabilidade	Carrocerias de veículos Estruturas Equipamentos
6351	Boa resistência mecânica Alta resistência à corrosão Boa conformabilidade Média usinabilidade	Engenharia estrutural Construção de navios Veículos e equipamentos Peças usinadas em tornos automáticos Forjamento a frio
7104	Alta resistência mecânica Boa resistência à corrosão Boa conformabilidade Apropriada para anodização decorativa	Estruturas soldadas

**Fonte: Delboni, 2007.**

### 3.9.1 Liga de Alumínio 6351-T6

Esta liga é indicada para aplicações estruturais, onde uma média a alta resistência mecânica é solicitada. A Liga 6351 oferece alta resistência mecânica, alta resistência à corrosão, boa conformabilidade em tâmperas O e T4, boa solvabilidade, porém não apresenta boa resistência a abrasão e boa extrudabilidade. (Silva, 2014).

Na figura 19, é mostrado as características de tâmperas.

**Figura 19 - Condições de Temperas**

Identificação	Definição
F	<b>Como Fabricado</b> Usado em produtos sem necessidade de controle especial sobre as condições térmicas ou trabalváveis a frio. Não existe garantia dos limites das propriedades mecânicas.
O	<b>Recozido</b> Usado em produtos trabalhado para obter a menor resistência, e em produtos fundidos para melhorar a ductilidade e a estabilidade dimensional.
H	<b>Encruada</b> Usado em produtos em que se aumentou a resistência por deformação plástica a frio e que podem, ou não, ser submetidos a recozimento complementar para produzir um amolecimento parcial ou a um ou processo de estabilização. É utilizado em ligas não tratáveis termicamente. É sempre seguido de um ou mais dígitos.
W	<b>Solubilizado</b> Usados em ligas que envelhecem naturalmente em temperatura ambiente após a solubilização.
T	<b>Termicamente tratado</b> Usado em produtos que sofrem tratamento térmico com ou sem deformação plástica complementar, que produz propriedades físicas estáveis e diferentes das obtidas com F, O e H. Deve ser seguida por um ou mais dígitos que indicam a seqüência dos processos realizados.
T4	<b>Solubilizado e envelhecido naturalmente</b> Usado em produtos que não sofrem deformação plástica depois do tratamento térmico de solubilização, ou onde o efeito do encruamento pode ser desprezado ao serem fixados limites para as propriedades mecânicas.
T5	<b>Resfriado bruscamente após processo de conformação a temperatura elevada, e envelhecido artificialmente</b> Usados em produtos que não sofrem deformação plástica a frio, depois de resfriados bruscamente após processo de conformação a temperaturas elevadas ou onde o efeito do encruamento pode ser desprezado ao serem fixados limites para as propriedades mecânicas.
T6	<b>Solubilizado e envelhecido artificialmente</b> Usados em produtos que não sofrem deformação plástica depois do tratamento térmico de solubilização, ou onde o efeito do encruamento pode ser desprezado ao serem fixados limites para as propriedades mecânicas.

**Fonte: Delboni, 2007.**

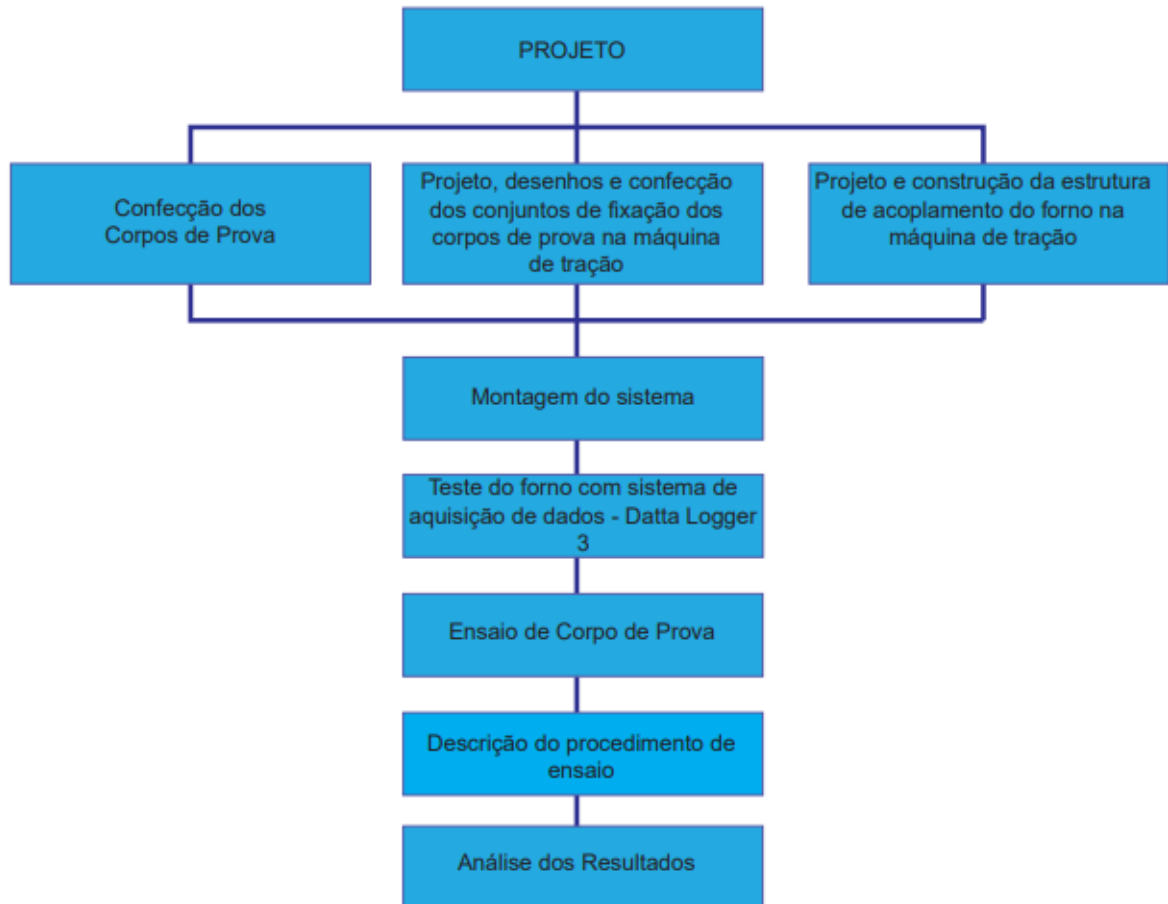
A solubilização envolve o aquecimento de uma liga a determinada temperatura com o objetivo de dissolver os átomos de soluto para formar uma solução sólida monofásica (CALLISTER, 2002).

O tratamento de solubilização é realizado para dissolver Mg<sub>2</sub>Si, homogeneizar a solução sólida e fragmentar e esferoidizar o eutético de silício. Esse tratamento é o que obtém melhor resistência mecânicas nas ligas. O tratamento consiste em aquecer a liga a uma temperatura de 500°C, para dissolução dos elementos de liga em meio a solução sólida, com resfriamento rápido em meio natural ou artificial (Silva, 2014).

## 4 METODOLOGIA

O desenvolvimento deste trabalho se desenvolveu em várias etapas que estão mostradas no fluxograma da figura 20.

**Figura 20 - Fluxograma**



**Fonte: O Autor**

Primeiramente foi necessário observar as condições de projeto para poder iniciar o cronograma. Os detalhes de viabilidade foram tratados nesse tópico, como mostrado na figura 20, que é o caso dos corpos de prova. Devido ao seu tamanho, causa impacto no dimensionamento do conjunto de fixação, pois a máquina de tração possui um limite de curso que deve ser respeitado para se obter ensaios corretos. Juntamente com os projetos mencionados foi confeccionada a estrutura metálica que serve de base para fixar o forno responsável por fazer o aquecimento no corpo de prova.



Após etapas de projeto e fabricação foi iniciado a etapa de montagem, tanto da estrutura e do forno, quanto dos conjuntos de fixação.

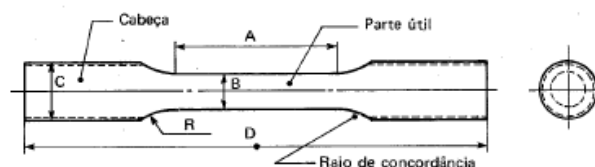
A etapa seguinte constitui em realizar ensaios para observar o funcionamento do forno elétrico, já que o mesmo não tinha sido utilizado ainda. Testes preliminares foram feitos sem corpo de prova para analisar quanto tempo o forno demora para atingir a temperatura desejada. Após os testes preliminares foi adicionado um corpo de prova para observar o impacto na taxa de aquecimento do forno de uma massa em seu interior, e foi então analisado as diferenças para determinar o tempo de aquecimento do forno.

Logo em seguida foi realizado os ensaios nos corpos de prova, em três diferentes faixas de temperaturas.

#### 4.1 Corpos de Prova

Os corpos de prova utilizados se assemelham aos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração e foram sugeridos por Garcia (1982), como mostrado da figura 21.

**Figura 21 - Corpo de Prova utilizado no ensaio de tração**



**Fonte – Souza, (1982)**

Na figura 22 é apresentada as medidas do corpo de prova utilizado para este tipo de ensaio.

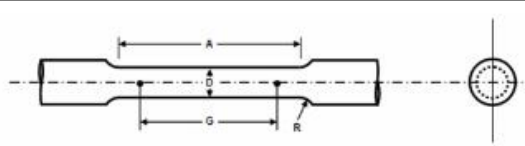
**Figura 22 - Dimensões do Corpo de Prova**

Corpo de prova	A (mm)	B (mm)	C (mm) (aprox.)	D (mm) (aprox.)	R (mm) (mín.)
Redondo – ABNT	70	10	18	150	15
Redondo – ASTM	60	12,5	18	130	15
Chapa fina – ABNT	75	12,5	20	200	20
Chapa grossa – ABNT	240	40	50	400	25
Chapa fina – ASTM	60	12,5	20	200	12,5
Chapa grossa – ASTM	225	40	50	450	25
Ferro fundido – ABNT – tipo A	30	20	30	100	25
Ferro fundido – ABNT – tipo B	105	20	30	180	25
Ferro fundido – ASTM – tipo A	32	12,5	22	95	25
Ferro fundido – ASTM – tipo B	38	19	32	100	25
Ferro fundido – ASTM – tipo C	57	31,5	47	160	50

**Fonte – Souza, (1982)**

Como o ensaio exige aparatos como alongadores e conexões, torna-se inviável usar o corpo de prova nos padrões originais, pois o comprimento final ficaria maior que o curso permitido pela máquina de tração, então foi feito uso de uma relação para diminuir o corpo de prova, como mostrado na figura 23, e desta forma ter um ensaio sem restrições.

**Figura 23 - Proporcionalidade utilizada para os corpos de prova**



Dimensões, mm

Dimensão nominal	Corpo de prova padrão	Corpos de prova reduzidos proporcionais ao padrão			
	12,5	9	6	4	2,5
G – Comprimento parte útil	62,5 ± 0,1	45,0 ± 0,1	30,0 ± 0,1	20,0 ± 0,1	12,5 ± 0,1
D – Diâmetro	12,5 ± 0,2	9,0 ± 0,1	6,0 ± 0,1	4,0 ± 0,1	2,5 ± 0,1
R – Raio de concordância, mín	10	8	6	4	2
A – Comprimento parte útil	75	54	36	24	20

**Fonte: Dieter, 1981**

O material utilizado nos corpos de prova foi a liga de alumínio T6-6351, por se tratar de uma liga comercial e pela disponibilidade deste material na Universidade. As tabelas das figuras 24 e 25 apresentam a composição e as propriedades desta liga.

**Figura 24 - Composição Química da liga Al 6351 – T6**

Designação	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Outros		Alumínio Mínimo
											Cada	Total	
6351	2,71	0,7 - 1,3	0,5	0,1	0,4 - 0,8	0,4 - 0,8	-	-	0,2	0,2	0,05	0,15	Restante

Fonte: DELBONI, 2007.

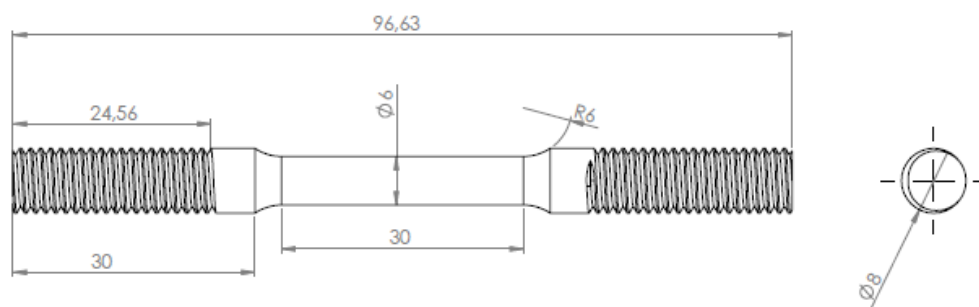
**Figura 25 - Propriedades mecânicas**

Liga	DIN	Têmpera	Limite de Resistência à Tração Mpa (N/mm <sup>2</sup> )		Limite de Escoamento Mpa (N/mm <sup>2</sup> ) Min.	Alongamento Mínimo "50mm" (%)	Dureza Brinell (HB)
			MÍN.	MÁX.			
<b>6351</b>	Al Mg Si1,0	T6	290	-	255	8	95

Fonte: Alumaticopper

Na figura 26 é mostrado o corpo de prova com as dimensões que foram utilizadas para os ensaios.

**Figura 26 - Dimensionamento do Corpo de Prova**



Fonte: O Autor

#### 4.2 Conjunto de Fixação do C.P.

As dificuldades foram surgindo antes mesmo dos ensaios, e umas delas foi a respeito de como fixar o corpo de prova na máquina, já que no laboratório não tinha algo parecido para auxiliar este tipo de ensaio. Para isto foram desenvolvidos

dispositivos alongadores resistentes a alta temperatura, com finalidade de distanciarem os dispositivos fixadores da máquina de tração (que são para baixa temperatura) do corpo de prova no interior do forno permitindo desta forma que o CP (corpo de prova) obtenha uma temperatura homogênea.

Como os alongadores estão sujeitos a altas temperaturas é importante que seja utilizado material com resistência a fluência.

Entre os principais fatores que afetam as características das propriedades em fluência são citados a temperatura de fusão, o módulo de elasticidade e o tamanho de grão cristalino, sendo que quanto maior esses parâmetros maior será a resistência à fluência. Os materiais mais resistentes à fluência podem ser descritos como sendo uma classe particular e complexa que são desenvolvidos para aplicações específicas, onde se pode destacar os aços inoxidáveis, já que possuem como principal elemento de liga o cromo com teores acima de 11%, as superligas ou ligas a base de níquel, cobalto ou ferro ou suas combinações ou até mesmo as ligas refratárias que apresentam elevado ponto de fusão (Garcia 2008).

Tendo como base a afirmação acima, para o caso dos alongadores e conexões foi selecionado um material resistente a fluência, ou seja, que pode conservar suas propriedades metalúrgicas mesmo submetido a temperaturas mais elevadas. Para atender essas características foi utilizado o aço inox SAE 310, que permite trabalhar com margem de segurança, já que esse material tem bom desempenho em fornos que operam até aproximadamente 900°C e por seu ponto de fusão ser da faixa de (1398 – 1454°C). Segundo fonte da empresa que forneceu o material. Os dados de composição química, foram obtidos do catálogo do fabricante e está mostrado na figura 27.

**Figura 27 - Composição Química do Aço Inox 310**

<b>AUSTENÍTICO</b>						
<b>Aço Cromo - Níquel - Molibedênio</b>				<b>Aço refractário</b>		
<b>316</b>	<b>316 S</b>	<b>316 L</b>	<b>316 Ti</b>	<b>309</b>	<b>310</b>	<b>310 S</b>
C% 0,08 Máx. Mn% 2,00 Máx. Si% 1,00 Máx. Cr% 16,0018,00 Ni% 10,0014,00 Mo%2,02,50	C% 0,08 Máx. Mn% 2,00 Máx. Si% 1,00 Máx. Cr% 16,0018,00 Ni% 12,0014,00 Mo%2,503,00	C% 0,03 Máx. Mn% 2,00 Máx. Si% 1,00 Máx. Cr% 16,0018,00 Ni% 10,0014,00 Mo%2,002,50	C% 0,08 Máx. Mn% 2,00 Máx. Si% 1,00 Máx. Cr% 16,0018,00 Ni% 10,0014,00 Mo%2,002,50 Ti5xC%0,80	C% 0,20 Máx. Mn% 2,00 Máx. Si% 1,00 Máx. Cr% 22,0024,00 Ni% 12,0015,00	C% 0,25 Máx. Mn% 2,00 Máx. Si% 1,50 Máx. Cr% 24,0026,00 Ni% 19,0022,00	C% 0,08 Máx. Mn% 2,00 Máx. Si% 1,50 Máx. Cr% 24,0026,00 Ni% 19,0022,00

Fonte: Irestal Group.

Para fixar os alongadores foram estabelecidas roscas M8x1,25 em suas extremidades que são conectadas aos corpos de prova através de uma luva rosca, também possuindo rosca interna M8x1,25. Este padrão de rosca também foram utilizados em todas as conexões que necessitaram de roscamento.

Os dispositivos alongadores e conexões foram desenhados no SolidWorks e usinados no laboratório de usinagem do DAMEC (H006).

#### 4.3 Estrutura de Acoplamento do Forno na Máquina Universal de Ensaio (Máquina de Tração)

Após o projeto do conjunto de ensaio, foi planejado uma maneira para a realização de ajustes da estrutura e forno com relação a máquina de ensaio de tração universal, sendo como principal o alinhamento paralelo do conjunto com o eixo de ensaio da máquina de tração. Para que se pudesse ter uma regulagem mais precisa foi escolhido fixar com parafusos M9x1.5 com 110 milímetros de comprimento e porcas referentes a este parafuso. Foram utilizados para tanto, duas porcas para fixar o forno a estrutura e mais duas que são responsáveis pela regulagem. A fixação foi feita com auxílio uma chave de boca número 13 para ajuste. Para isso foi utilizado 4 parafusos, 12 porcas como elemento de fixação e 8 arruelas.

Foram feitos ajustes até se obter um resultado satisfatório da adaptação do forno à máquina de tração e anexar o conjunto de equipamentos necessários para a realização do ensaio. Este ajuste permitiu o alojamento do corpo de prova no centro do forno, permitindo assim uma distribuição uniforme da temperatura.

#### 4.4 Montagem do Sistema

Para maior praticidade no ensaio foi fabricado uma estrutura para anexar o forno de fluência a máquina universal de ensaio (máquina de tração). Esta estrutura facilita a operação uma vez que pode ser colocado e retirado o forno com facilidade.

A estrutura metálica foi projetada no SolidWorks e fabricada com perfis laminados possuindo características geométrica na forma de "U" (comercialmente conhecido como perfil U), e foram utilizados dois perfis caracterizados de terças e de

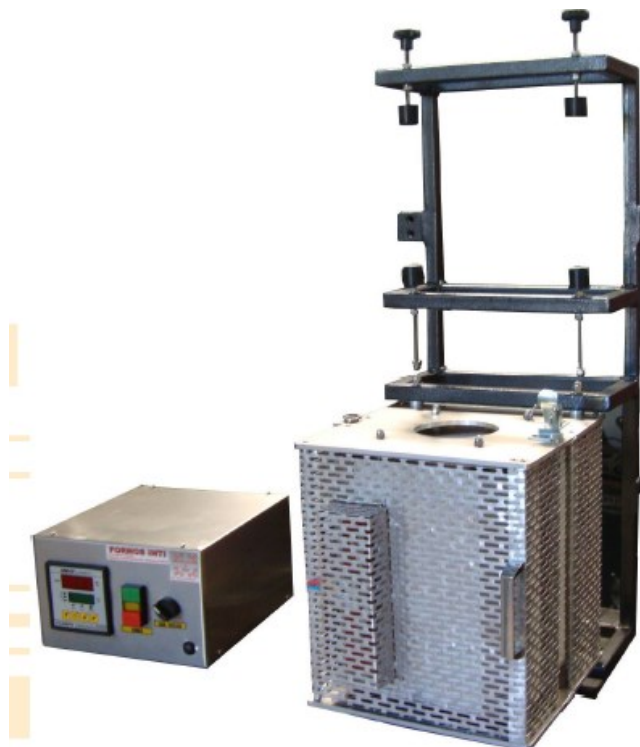
características distintas, que são os 75x40#2 mm e 68x35#2 mm, para se possibilitar o encaixe de forma correta e obter por consequência uma estrutura mais rígida, possibilitando um travamento adequado.

A fabricação da estrutura foi realizada fora da Universidade, com auxílio de soldador a arco elétrico, por motivos de praticidade e a disponibilidade do equipamento em casa. Primeiramente foram se juntando as peças e ponteando até se obter o melhor alinhamento, posteriormente foi realizado cordões de solda e pintado a estrutura para fins de conservação.

#### 4.5 Forno de Fluência

A adaptação do ensaio foi feita em um forno elétrico da marca INTI, modelo FT-1200 R, disponível no laboratório de ensaios de materiais (H005) do DAMEC. O modelo do forno é compatível ao ensaio, podendo assim ser utilizado para sequência deste trabalho. Na figura 28 segue uma imagem do forno a ser utilizado.

**Figura 28 - Forno elétrico INTI – FT 1200 R**



**Fonte: Fornos INTI**

Alguns dados do forno e o manual de operação foram obtidos em contato com o fabricante.

Na figura 29 pode ser verificado a condições de trabalho do forno.

**Figura 29 - Dados Forno elétrico INTI – FT 1200 R**



Fonte: O Autor

#### 4.6 Ensaio do C.P.

Os C.P. foram ensaiados em três diferentes temperaturas procurando se obter uma diferença considerável entre as temperaturas nas condições apresentadas a seguir:

- Temperatura Ambiente
- Temperatura de 175°C
- Temperatura de 275°C

#### 4.7 Descrição dos Procedimentos

Foram descritos procedimentos de acoplamento do forno, posicionamento de termopares e do ensaio do C.P. e estão apresentados na secção dos resultados.

Para estabelecer um padrão de tempo de aquecimento e de homogeneização de temperatura no forno antes de iniciar o ensaio, após a configuração dos parâmetros do ensaio, foi instalado os termopares responsáveis por fazer a leitura das temperaturas durante os ensaios. Para isto foi feito uso de um equipamento de aquisição de dados, o Data Logger 3 da BenchLink, do laboratório de ensaios térmicos do DAMEC (H003) que registra os dados de temperatura ao longo do tempo, conforme intervalo determinado. Neste estudo foi feito a aquisição dos dados de temperatura a cada segundo, gerando assim, 60 leituras por minuto. O equipamento é mostrado na figura 30.

Os termopares utilizados nos ensaios são os do tipo K com termoelemento a base de Chromel conforme mostra a tabela 02.

**Tabela 2 - Faixas do Termopar Tipo K**

Tipo do Termopar	Nome do Termoelemento	Faixa de Utilização (C°)	Limite de Erro	
			Padrão	Especial
Termopar tipo K	(+) Chromel	0 a 1260	±2,2°C ou ±0,75%	±1,1°C ou ±0,4%
	(-) Alumel	-200 a 0	±2,2°C ou ±2%	-

Fonte: Ecil



**Figura 30 - Equipamento de Medição, Data Logger 3**

Fonte: O Autor

A figura 31 mostra a disposição dos termopares em relação ao corpo de prova e ao forno. Os termopares foram dispostos em posições de maneira a obter o ponto onde a temperatura se torne homogênea. O forno possui um termopar tipo K que coordena o aumento e o patamar de temperatura do forno. Este termopar está colocado entre as resistências do forno, na parte do isolamento juntamente com o refratário, isto causa uma dispersão da temperatura quando se comparado com a temperatura no centro do forno, onde o corpo de prova está alocado. Isto faz com que a temperatura que o forno marca em seu visor, tende a ser sempre maior que a temperatura no centro, onde estão os termopares do equipamento Data Logger, exigindo assim aguardar por um determinado tempo, variando para cada material.

**Figura 31 - Disposição Termopares dentro do Forno**



**Fonte: O Autor**

Os parâmetros utilizados para a realização dos ensaios de fluência estão, apresentados na tabela 03. Estes mesmos parâmetros foram utilizados para todos os ensaios para evitar interferência da taxa de aquecimento e outras variáveis que possam afetar os resultados.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Dispositivos de Fixação e Corpos de Prova

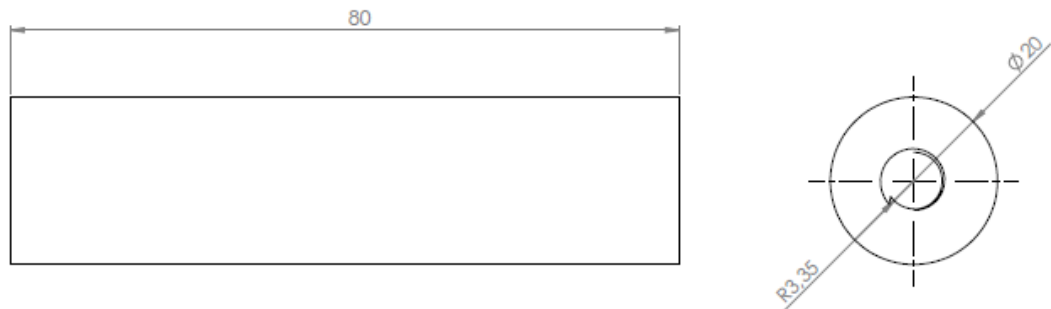
A fabricação do articulador juntamente com o alongador, usado para garantir o máximo de alinhamento possível no ensaio, é mostrado na figura 32. Fabricado com uso de solda TIG, para soldar o aço inox SAE 310 com rosca em uma das extremidades ao articulador, de modo que ambos se tornem uma única peça. Este sistema permite acesso para troca do componente roscado caso haja necessidade, pois ele está conectado ao articulador através de um parafuso passante travado por uma porca de sua respectiva classe. Foram fabricados no laboratório de usinagem (H009), no laboratório de soldagem (H007) e uma parte foi fabricado fora da universidade.

**Figura 32 - Fabricação e montagem do articulador e alongador**



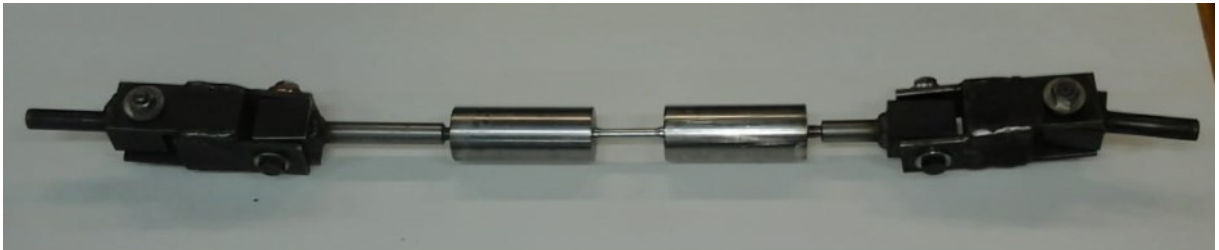
**Fonte: O Autor**

Na figura 33, é mostrado o projeto luva da conexão.

**Figura 33 - Projeto da luva de conexão**

Fonte: O Autor

Na figura 34, é mostrado a fabricação da luva de conexão e sequência de montagem do conjunto.

**Figura 34 - Montagem do conjunto**

Fonte: O Autor

Na figura 35 é mostrado a disposição do conjunto com reação a máquina de ensaio de tração, podendo verificar o paralelismo e o corpo de prova ao centro, é possível observar ainda que as conexões além de fazer a ligação entre o corpo de prova e os alongadores, está ajudando no isolamento do forno, pois seu diâmetro é da mesma medida do orifício do forno, fazendo com que não se essa energia térmica não saia do forno e por consequência melhora a eficiência.

**Figura 35 Montagem do Conjunto de Ensaio na Máquina de Tração**



**Fonte: O Autor**

A figura 36 mostra que o procedimento de ensaio ficou simples e prático, possibilitando a troca do corpo de prova de maneira mais rápida e fácil sem necessidade de estar tirando o forno e por consequência a estrutura de lugar, o que de fato atrasaria e muito os ensaios seguintes. Uma observação importante é a necessidade do uso de uma luva apropriada para o manuseio dos corpos de prova no conjunto, pois se trata de um forno com temperaturas elevadas.

Os corpos de prova foram usinados em torno convencional, com auxílio de ferramentas adequadas, como ferramenta de corte, paquímetro. A figura 38 mostra sua forma após usinagem e roscamento.

**Figura 36 - Corpo de Prova Usinado**

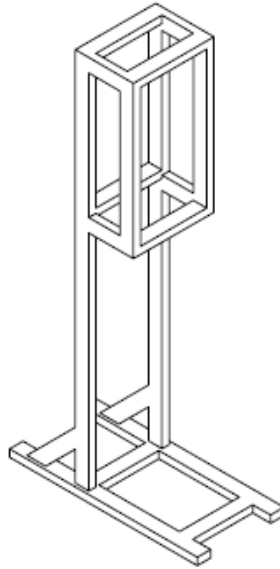


**Fonte: O Autor**

### 5.3 Estrutura de Fixação e acoplamento do forno na máquina de tração

A estrutura de fixação foi executada fora da UTFPR. Por motivos de praticidade, foram utilizado terças simples para sua fabricação, e efetuado solda a arco elétrico para união dos componentes, devido a disponibilidade dos equipamentos de soldagem. Após fabricação da estrutura foi realizado a montagem do forno elétrico. A figura 37 mostra a estrutura e a figura 38 o acoplamento do forno a máquina de tração, visando maior praticidade.

**Figura 37 - Projeto da Estrutura Metálica**



**Fonte: O Autor**

**Figura 38 - Montagem da Estrutura e Acoplamento do forno.**



**Fonte: O Autor**

#### 5.4 Procedimento de Ensaio em tração à Quente

Ao se iniciar o ensaio, é necessário submeter o conjunto a uma temperatura de aproximadamente 10°C abaixo da escolhida para realizá-lo o ensaio, entre 1 a 4 horas dependendo do material. Este passo é importante para que o conjunto e o corpo de prova possam se “acomodar” e conseqüentemente reduzir as tensões residuais para não afetar os resultados.

**Tabela 3 - Parâmetros de Ensaio**

	Setpoint 01	Setpoint 02	Rampa Aquecimento	Rampa Aquecimento	Tempo Permanecia	Tempo Permanecia	Alarme
Função / Temperatura	SP01 °C	SP02 °C	RP01 °C/min	RP02 °C/min	PE01 min	PE02 min	AL1B -
175	165	175	30	5	120	10	3
275	265	275	30	5	120	10	3

**Fonte: O Autor**

Os ensaios foram divididos em três etapas, onde a primeira foi a realização de ensaio a temperatura ambiente, próximo aos 23°C, com uma velocidade de tração constante de 10 mm/min, a segunda etapa foi realizado um ensaio de fluência a temperatura de 175°C e a terceira etapa, um ensaio de fluência a temperatura de 275°C, ambas com velocidade de tração constante de 10 mm/min, assim como o ensaio de tração a temperatura ambiente, e alguns parâmetros apresentados na tabela 3.

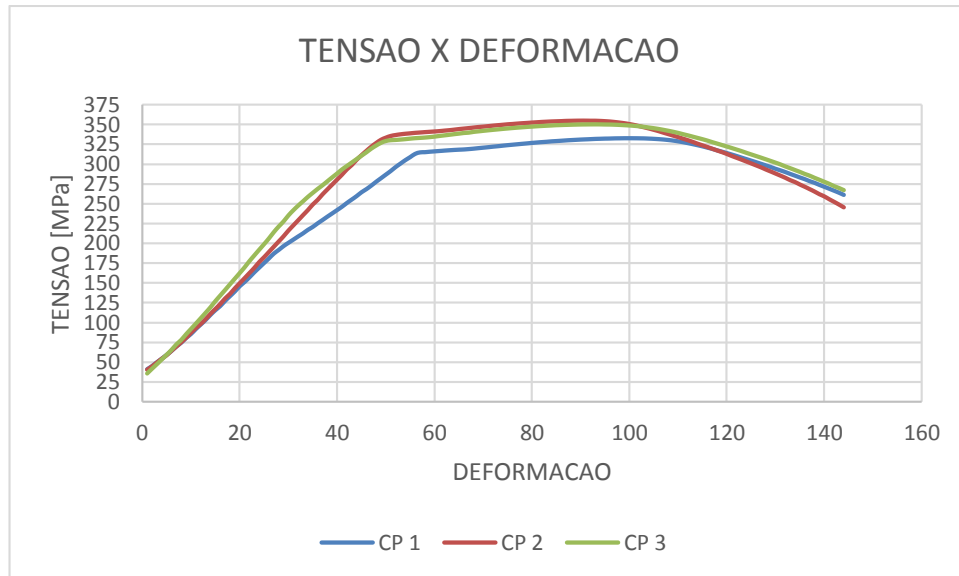
#### 5.5 Ensaio do Corpo de Prova em Alumínio 6351-T6

##### 5.5.1 Ensaio de Tração a Temperatura Ambiente.

São apresentados os resultados do ensaio, que consiste em uma curva Tensão x Deformação. Ensaio este realizado em três corpos de prova, como apresentado na figura 39.



**Figura 39 - Tensão x Deformação – Temperatura Ambiente C.P. 01, C.P. 02 e C.P. 03**



**Fonte: O Autor**

Os dados das curvas, mostrado nos gráficos da figura 39 são os valores de tensão, ou seja, limite de resistência a tração que cada corpo de prova resistiu. E os valores derivados dos ensaios apresentados pelas curvas tensão x deformação são apresentados na tabela 4.

**Tabela 4 - Limite de Resistencia à Tração C. P. Temperatura Ambiente**

Corpo de Prova	Limite de Resistência a Tração [MPa]
01	352
02	333
03	354

**Fonte: O Autor**

Com base nas curvas obtidas através dos ensaios, realizou-se as medições de alongamento e área da secção transversal, sendo apresentadas na tabela 5.

**Tabela 5 - Dados de Ensaio de Tração a Temperatura Ambiente**

C.P.	Velocidade Tração [mm/min]	Diâmetro inicial [mm]	Diâmetro final [mm]	Comprimento inicial [mm]	Comprimento final [mm]
01	10	6	4,05	30	34,25
02	10	6	4	30	33,35
03	10	6	4,1	30	34,00

**Fonte: O Autor**

Com os dados acima se obteve os percentuais de alongamento e de redução da área de seção transversal, conforme tabela 06.

**Tabela 6 - Percentuais derivados do ensaio a Temperatura Ambiente**

Corpo de Prova	Deformação convencional (%)	Redução da Área Secção Transversal (%)
01	14,1	52,8
02	11,1	55,5
03	13,3	53,3

**Fonte: O Autor**

Nos resultados apresentados foi verificado que o limite de resistência a tração está semelhante ao da figura 25, juntamente com os percentuais de alongamento.

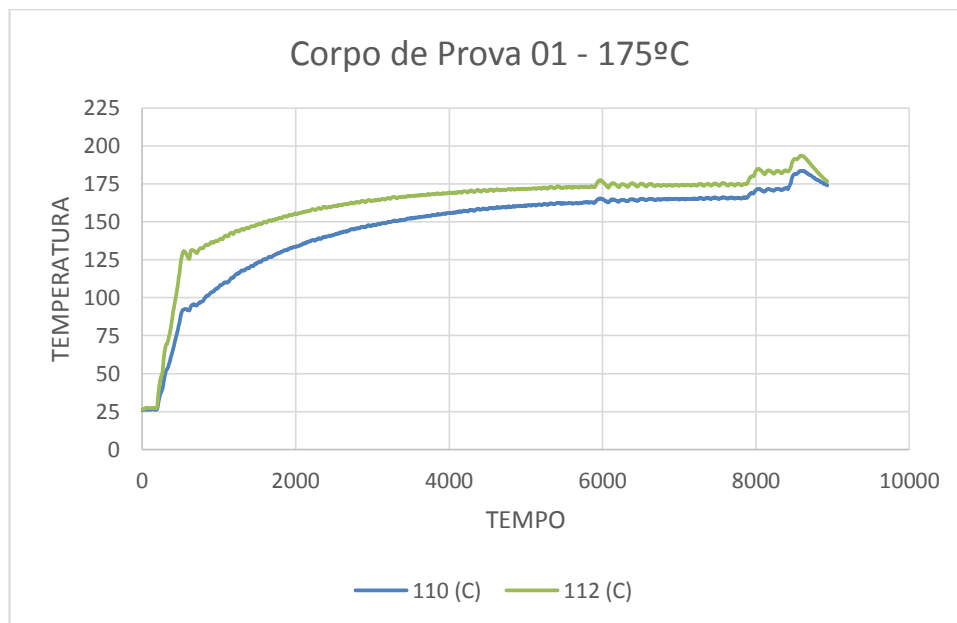
#### 5.4.2 Ensaio de Tração à Quente a Temperatura de 175°C

Para este ensaio foi preciso estabelecer o tempo necessário para atingir o valor de temperatura estipulado. A partir desse tempo foi acrescentado mais uma hora para que a temperatura do corpo de prova estivesse homogênea em toda sua massa. Para se obter esses tempos foi realizado testes no forno antes de se iniciar os

ensaios de tração à quente. A tabela 3 apresenta de forma simplificada como foi tratado os tempos e temperaturas para o ensaio de tração à quente.

Com o auxílio do programa Data Logger 3 foi obtida uma curva que serve para interpretar o modo como a temperatura se comportou durante o ensaio, conforme figura 40. Já na figura 41 é apresentado os resultados dos ensaios de tração à quente, contendo as três curvas tensão x deformação em uma única figura.

**Figura 40 - Curva Temperatura x Tempo – C.P. 01 – 175°C**

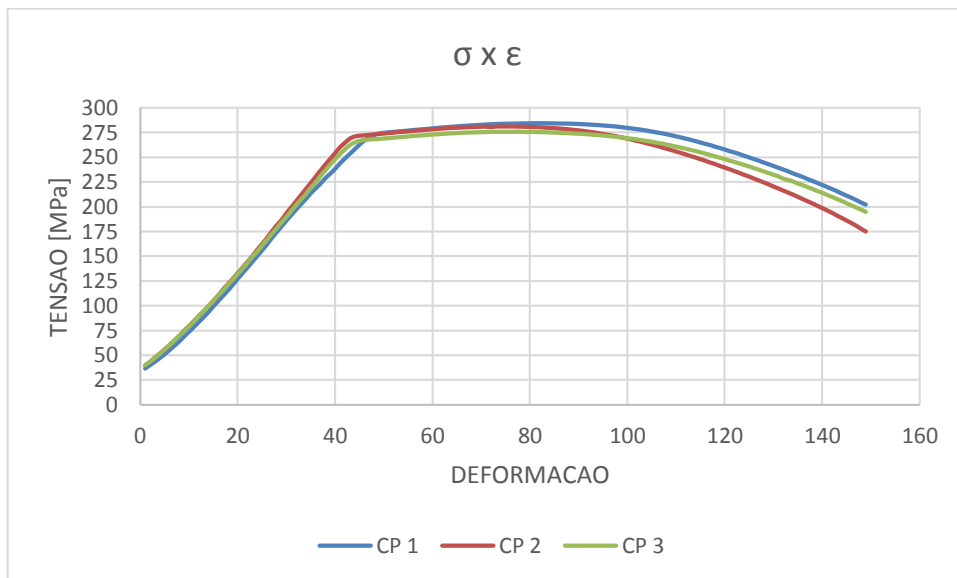


Fonte: O Autor

A curva da figura 40 apresenta resultados de dois termopares, isto para verificar a variação de temperatura com o termopar encostado no centro do corpo de prova e outro termopar próximo ao corpo de prova, mas com sua ponteira que faz a leitura exposta ao ambiente do forno, e como nota-se a curva do termopar número 112 em verde atingiu temperatura mais elevada, do que a do termopar 110, de cor azul, justamente por que o termopar número 110 estava medindo também a temperatura devido a massa inercial do corpo de prova. Está análise válida para todos os casos, variando somente a distância que o termopar exposto ao ambiente do forno ficou do corpo de prova.

Os dados de ensaio são apresentados através da curva Tensão x Deformação levantadas pelo software da máquina de ensaio de tração são apresentados na figura 41, contendo os resultados dos três corpos de prova.

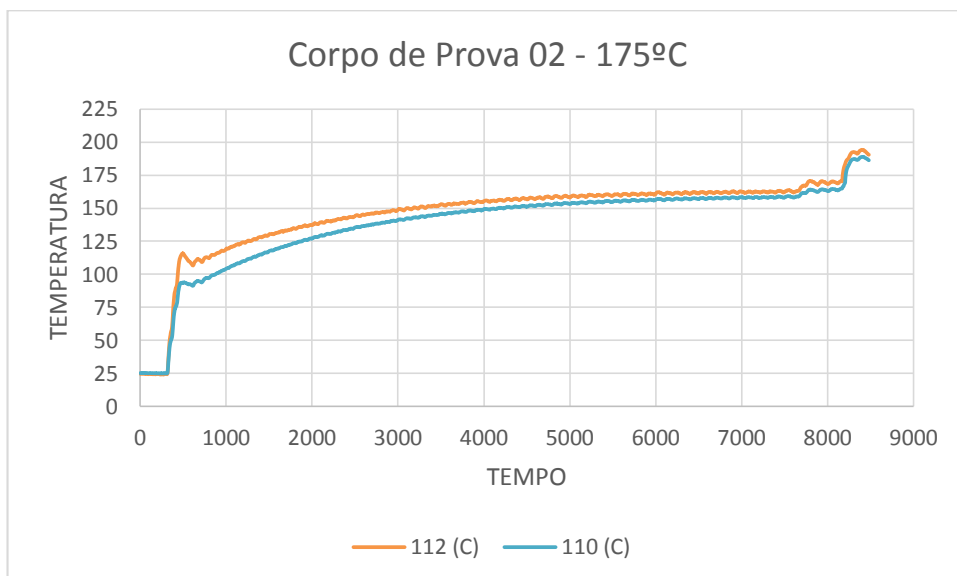
**Figura 41 - Curva Tensão x Deformação para os C.P. 01, 02 e 03 – 175°C**



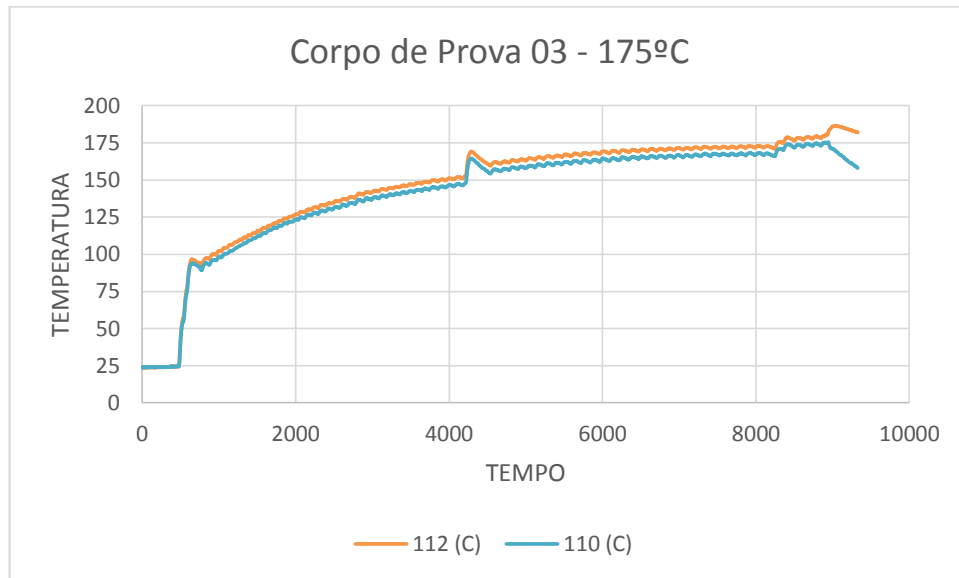
Fonte: O Autor

Abaixo é mostrado as figuras 42 e 43, dos corpos de prova dois e três respectivamente, onde se pode notar as curvas de temperatura x tempo para os outros dois corpos de prova, que já tiveram seus resultados apresentados na figura 41.

**Figura 42 - Curva Temperatura x Tempo – C.P. 02 – 175°C**



Fonte: O Autor

**Figura 43 - Curva Temperatura x Tempo – C.P. 03 – 175°C**

Fonte: O Autor

Na tabela 7, se observa os dados de deformação convencional e redução da área de seção transversal.

**Tabela 7: Dados dos C. P. – Ensaio à 175°C**

Corpo de Prova	Deformação convencional (%)	Redução da Área Secção Transversal (%)
01	15,3	40,0
02	14,3	38,3
03	13,4	39,1

Fonte: O Autor

Como feito para os corpos de prova acima, foi estabelecido os valores do limite de resistência a tração, e os dados estão mostrados na tabela 8.

**Tabela 8: Limite de Resistencia à Tração – Ensaio 175°C**

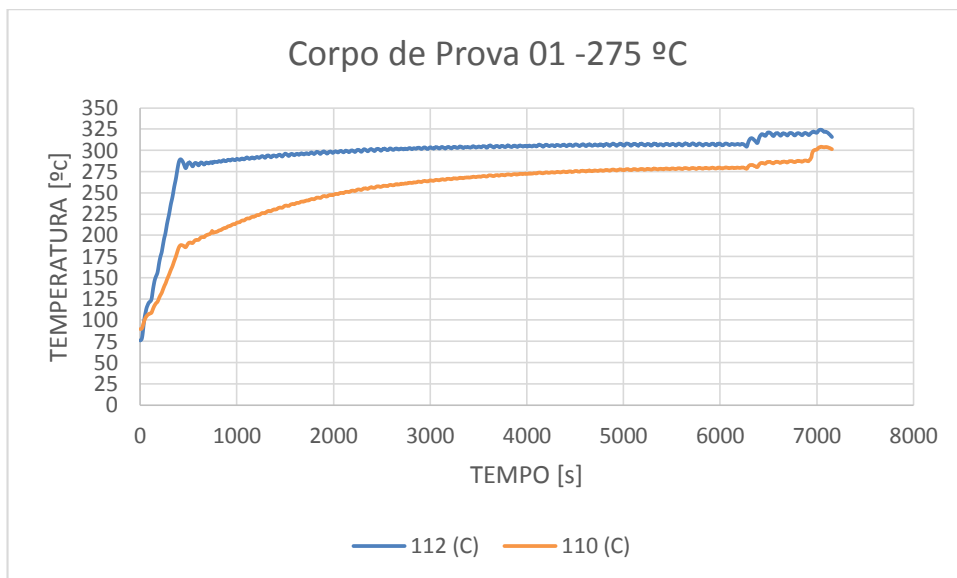
Corpo de Prova	Limite de Resistência a Tração [MPa]
01	284
02	280
03	275

Fonte: O Autor

### 5.4.3 Ensaio de Tração à Quente a Temperatura de 275°C

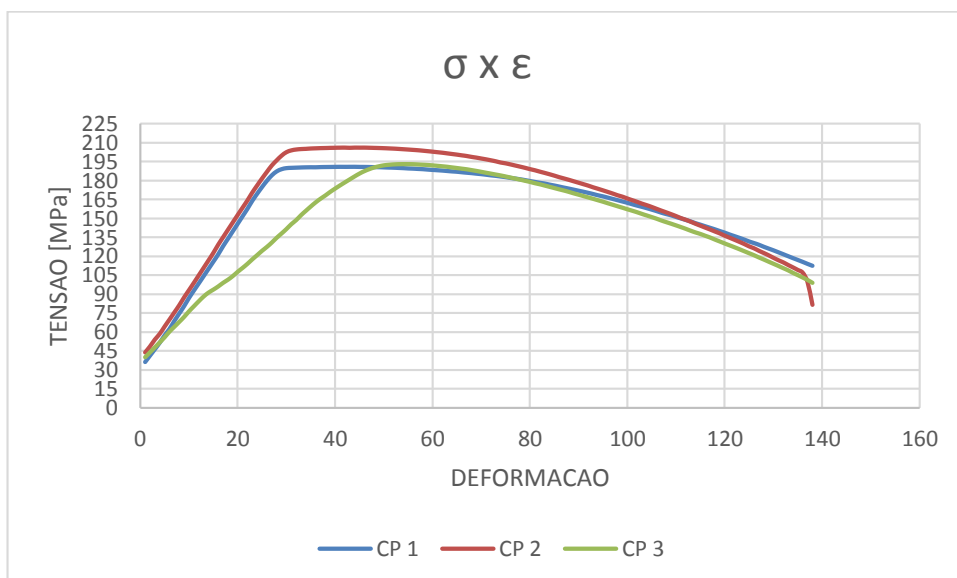
De maneira análoga, a segunda etapa do ensaio de tração à quente para os corpos de prova ensaiados a temperatura de 275 graus Celsius tem seus resultados de temperatura x tempo e tensão x deformação mostrados na figura 44 e 45 respectivamente.

**Figura 44 - Curva Temperatura x Tempo – C.P. 01 – 275°C**



Fonte: O Autor

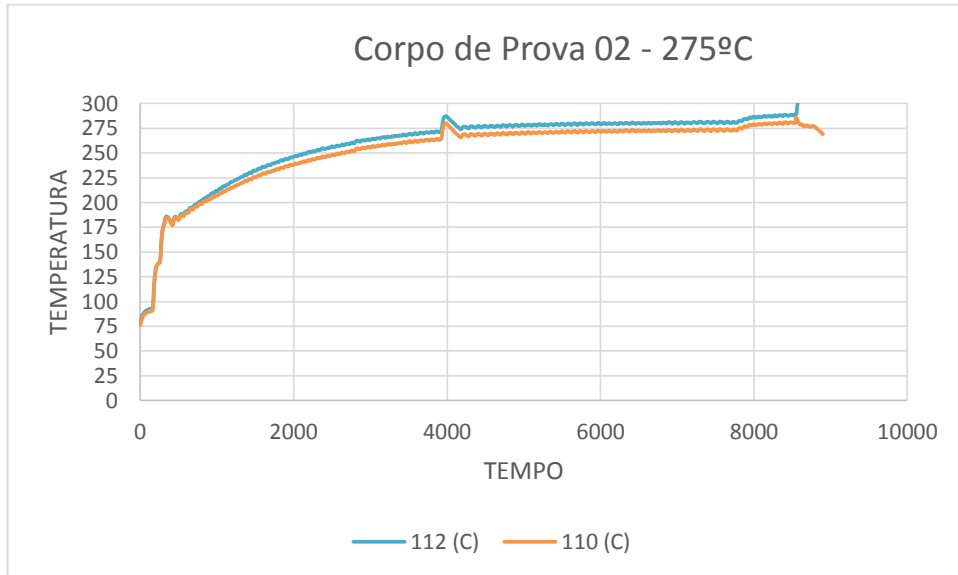
**Figura 45 - Curva Tensão x Deformação para os C.P. 01, 02 e 03 – 275°C**



Fonte: O Autor

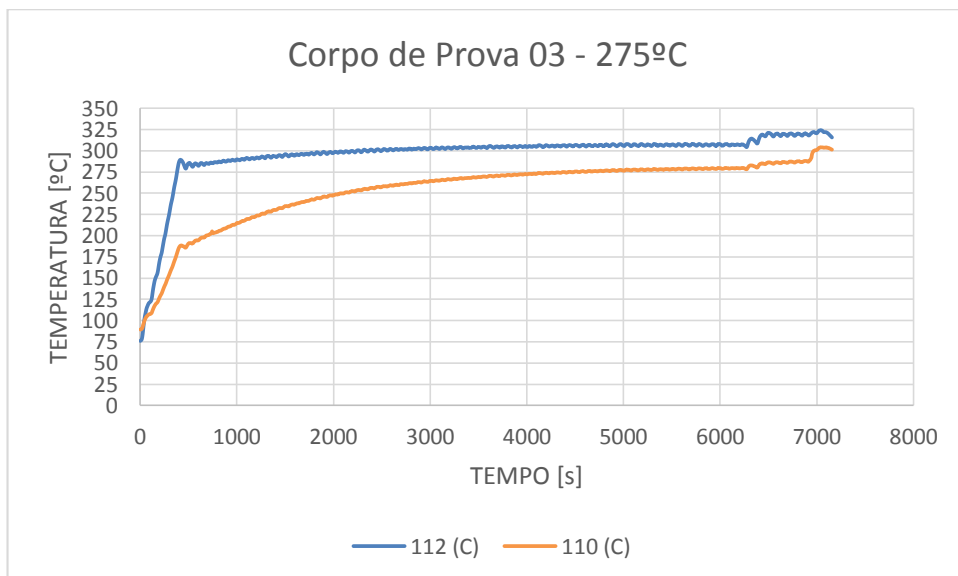
Nas figuras 46 e 47 são mostradas as outras duas curvas que compõem os resultados de temperatura x tempo, para a realização dos ensaios dos outros dois corpos de prova.

**Figura 46 - Curva Temperatura x Tempo – C.P. 02 – 275°C**



Fonte: O Autor

**Figura 47 - Curva Temperatura x Tempo – C.P. 03 – 275°C**



Fonte: O Autor

**Tabela 9: Dados do C. P. – Ensaio à 275°C**

Corpo de Prova	Deformação convencional (%)	Redução da Área Secção Transversal (%)
01	14,0	44,1
02	12,5	43,3
03	11,1	45,8

Fonte: O Autor

**Tabela 10: Limite de Resistencia à Tração – Ensaio 275°C**

Corpo de Prova	Limite de Resistência a Tração [MPa]
01	167
02	188
03	192

Fonte: O Autor

Através dos ensaios foi observado que à temperatura ambiente o corpo de prova atingiu valores de resistência e alongamento semelhantes aos da figura 25. Desta forma pode-se estabelecer que o conjunto fabricado para ensaio de fluência e tração à quente, não afetou os resultados, uma vez que os corpo de prova romperam dentro da faixa estabelecida. O percentual de alongamento ficou acima dos 8% conforme mencionados na figura 25. Este valor está dentro do esperado para este tipo de material. O limite de resistência a tração também ficou acima do mínimo, que é de 290 MPa.

Para os ensaios a temperatura mais elevadas, os valores de resistência a tração foram decrescendo com o aumento de temperatura confirmando o que Delboni (2007) descreveu, de que com o material submetido a temperatura de 180 a 250°C perde aproximadamente 50% da sua resistência a tração, estabelecendo assim, coerência entre o experimento deste trabalho e a literatura.

Alguns parâmetros devem ser salientados, como por exemplo as faixas de temperaturas que podem influenciar nos resultados, por se tratar de uma liga de alumínio com tratamento da classe T6, isso significa que foi solubilizado e envelhecido artificialmente, a temperatura de solubilização é de aproximadamente 540°C e resfriado rapidamente, e possui temperatura elevada novamente para



aproximadamente 155°C para se realizar o envelhecimento da liga, temperatura está que é muito próxima a segunda etapa dos ensaios, que é de 175°C, para perceber como se comportaria o material nesta situação. Em contra partida, o alongamento dos corpos de prova dos ensaio da etapa dois (ensaio a 175°C) obterão valores maiores do que os ensaios da etapa três (ensaio a 275°C), isto é, na medida que a temperatura aumentou, em consideráveis 100°C, a expectativa era de que o alongamento se comportasse de modo crescente, e os ensaios mostraram que isso não ocorreu, devido a uma fragilização do material, fazendo com que entrasse em colapso ao invés de continuar se deformando.

A temperaturas baixas, mesmo que por mais tempo exposto, os resultados permanecem muito próximos, ocasionando impacto significativo somente para temperaturas da ordem de 500°C, se tratando do alumínio, já que seu ponto de fusão é de aproximadamente 660°C.

**Figura 48 - Dados para comparação - Ensaio de Tração a Quente para liga A 6351 – T6**

Tempo (min)	100°C (MPa)	Desvio Padrão	300°C (Mpa)	Desvio Padrão	500°C (Mpa)	Desvio Padrão
0	356	8	356	8	356	8
15	373	7	376	7	167	4
30	332	9	340	7	112	10
60	377	7	207	4	119	7
120	371	5	157	2	134	2

**Fonte: Delboni, 2007.**

Para análise com aumento da temperatura nos ensaios, se observa, juntamente com a figura 48 e as tabelas 7 e 9, que a temperaturas próximas a 100°C o limite de resistência a tração se mantém estável independente do tempo de exposição ao meio aquecido, mas quando a temperatura é elevada para 300°C, o tempo interfere de forma crítica, quanto mais exposto a determinada temperatura aumenta a tendência a se perda o limite de resistência a tração.

O reaquecimento da liga solubilizada geralmente na faixa de 120 a 200°C, favorece a precipitação artificial sub microscópica da fase ou das fases intermediárias, com aumentos de dureza, resistência à tração e menor resistência a corrosão (COUTINHO, 1980). Com base nesse paragrafo se reforça conceito analisando os

resultados das curvas, que para determinada faixa de temperatura o material pode até obter ganho de resistência de limite a tração.

## 6 CONCLUSÃO

O projeto de adaptação da estrutura e acoplamento do forno, a máquina de ensaio universal de tração, possibilitou pôr em prática mais um tipo de ensaio no laboratório de ensaios (H005), da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Pato Branco, contribuindo para práticas didáticas e área de pesquisa.

Os sistemas de fixação dos C.P. na máquina de tração são de fácil entendimento e práticos, devido ao sistema de roscamento que garante qualidade ao ensaio.

Os sistemas de fixação também atuam como isolante. Ainda que o inox conduza calor, as perdas por condução neste caso possui um efeito bem menor do que por convecção, devido a luva de conexão ser do mesmo diâmetro do orifício do forno.

O forno foi instalado à estrutura metálica de forma simples, caso haja a necessidade de se retirar, ou fazer regulagens, isso possa ser feito com auxílio de chaves encontradas com facilidade no dia-a-dia.

Os testes realizados permitem entender de maneira mais coerente o funcionamento do forno, desde a programação dos parâmetros até mesmo em questões de inércia térmica devido ao adição de uma massa em seu interior. O equipamento de medição dessas temperaturas em função do tempo foram de grande importância para se elevar a qualidade dos ensaios.

Sabendo a importância dos materiais nos dias de hoje e suas aplicações, a análise final do projeto e fabricação dos componentes utilizados para os ensaios, podemos concluir que o resultado foi satisfatório.

Observou-se que para cada faixa de temperatura as propriedades mecânicas se alteram, ocasionando uma fragilidade do corpo de prova.

Este trabalho foi realizado com pouca variação de temperaturas, devido aos processos de instalação e funcionamento do conjunto, mas uma indicação para futuros trabalhos, é ampliar essas faixas de temperaturas para se poder ter maior compreensão do quanto faixas específicas de temperaturas afetam o rendimento dos materiais, e conseqüentemente aplicar esse conhecimento em outros tipos de materiais, podendo os comparar.

## REFERÊNCIAS

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

CARDOSO, M. D. Comportamento e Mecanismos de Falha à Fluência em Aços P91 e Juntas Soldadas – Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2009.

DELBONI, C. P. “Análise Experimental da Degradação Térmica da liga de Alumínio 6351-T6 para Uso Estrutural”. Dissertação de Mestrado, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2007.

DIAS, C. R. F. correlação entre os resultados de tração a quente e fluência para o cobre comercial puro – Tese de Mestrado em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, 2010.

DIETER, George E. Metalurgia Mecânica. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.

DORNELAS, D. A. Caracterização Mecânica em Temperaturas Elevadas da Superliga MAR–M247. Dissertação de Mestrado em Ciências na área de materiais metálicos, cerâmicos e poliméricos, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de Lorena, 2012.

EULOTÉRIO, O. M. Avaliação Comportamental em Fluência de Vasos de Aço 16Mo3 para Transporte de Material Siderúrgico: Caso de Carros Torpedo – Dissertação de Mestrado do curso de pós graduação em Engenharia de Materiais, REDEMAT, Ouro Preto, 2009.

EVANS, R.W.; Wilshire, B. “Introduction to creep”. London: The Institute of Materials, 1993.

GARCIA, Amauri; SPIN, Jaime A.; SANTOS, Carlos A. dos. **Ensaio dos Materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

GOBBI, V. J. Comportamento em Fluência e caracterização microestrutura das superligas VAT 36, VAT 32 e NIMONIC 80 A. Tese de Doutorado em ciências mecânicas – Programa de pós-graduação em engenharia mecânica, na área de engenharia de materiais e metalúrgica, Universidade federa de Brasília, 2013.

KAWAKAMI, M. S. Estudo da Fluência dos Aços Inoxidáveis Ferríticos Estabilizados ao Titânio e Nióbio e Simulação Numérica do Processo no Abaqus – Dissertação para obtenção do título de Engenheiro Mecânico, Universidade Estadual Paulista, 2011.

LAWRENCE H. Van Vlack. Princípios de Ciências dos materiais, São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 1970.

LEMOS G. Efeito Da Temperatura De Revenido Na Microestrutura E Nas Propriedades Mecânicas Em Alta Temperatura Do Aço X22crmov12-1. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós Graduação em ciências e engenharia de materiais, Universidade federa de Santa Catarina, 2015.

MEYERS, M.A.; CHAWLA, K.K. Princípios de metalurgia mecânica. São Paulo: Edgard Blücher, 1982.

MONTEIRO, R. G. Análise Da Fluência e Previsão De Vida Útil Dos Aços Astm A387, Astm A516 E Din 16mo3 Aplicados Na Fabricação De Conversores-Ld – Dissertação de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica na área de materiais e processos fabricação, Universidade Federal de São Joao Del-Rei, 2013.

MORETO J. A. Correlação de dados de tração a quente e fluência para a liga Kanthal A1 - R. Esc. Minas, Ouro Preto, 64(2), 181-186, abr. jun.; 2011.

Pacheco, J.L. “Desenvolvimento de metodologia para avaliação da interação fadiga e fluência em aço API P22” - Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2001.

PADILHA, A. F. Materiais de Engenharia, microestrutura e propriedades, Rio de Janeiro: Hemus, 2000.

Reed-Hill, R.E. “Princípios de metalurgia física”. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982.

REIS, D.A.P. Efeito do recobrimento cerâmico e da atmosfera de ensaio na fluência de liga metálica refratária de titânio - Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2005.

SANTOS, N. B. Avaliação de um critério de equivalência entre dados de tração a quente e fluência em aços – Tese de Mestrado em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, 2007.

Silva, J. P. “Avaliação do Comportamento das Ligas de Alumínio 6005, 6063, 6351 Submetidas a Diferentes Tratamentos Térmicos” Dissertação para obtenção do título de Engenheiro Mecânico, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2015.

SOUZA, Sérgio Augusto de. Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos. 5. ed. São Paulo: Blucher, 1982.

INTI, Fornos. Indústria de fornos para ensaios mecânicos. Disponível em: <<http://www.fornosinti.com.br/inti/>>, acesso em 03 de agosto de 2017,

IRESTAL, Group. Fichas Técnicas de aço Inoxidável. Disponível em: <<http://data.irestal.com/files/files/2012030204152715829.pdf>>, acesso em 06 de outubro de 2018.

FLEVER, Tecnologia Eletrônica, Manual do Forno. Disponível em: <http://www.flyever.com.br/web/wp-content/uploads/2014/12/FE50RPN-MAN018.pdf>, acesso em 01 de agosto de 2018.

ECIL, Temperaturas Industriais. Disponível em: <http://www.ecil.com.br/temperatura-industrial/termopares/termopar-tipo-k/>, acesso em 15 de outubro de 2018.

COPPER, Alumi. Disponível em: [https://www.alumicopper.com.br/pdf/aluminio/info-tec-alumi\\_aluminio\\_6351.pdf](https://www.alumicopper.com.br/pdf/aluminio/info-tec-alumi_aluminio_6351.pdf), acesso em 13 de Outubro de 2018.

## APENDICE A

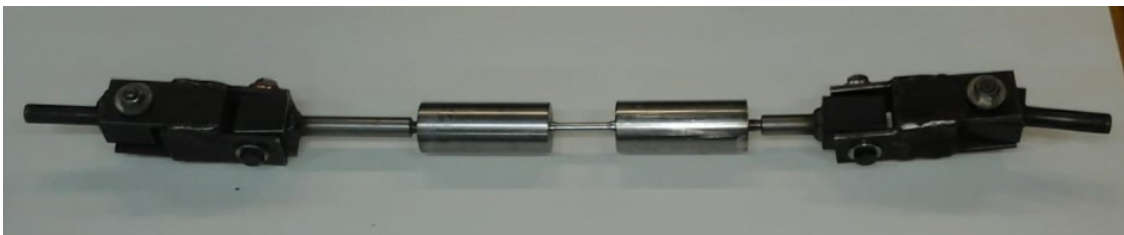
### MÉTODOS DE ENSAIO

#### PROCEDIMENTO

Aqui está descrito o modo de funcionamento dos equipamentos e as condições seguras de como realizar os ensaios de tração à quente.

Aproximar a estrutura juntamente com o forno de fluência a máquina de tração e verificar se o forno está na linha de centro das pinças da máquina.

Montar o conjunto como mostrado na figura abaixo.



Os articuladores nas extremidades, luvas de conexão para fazer a junção do articuladores e o corpo de prova, e no meio o corpo de prova já usinado e roscado.

Sua montagem é de maneira rápida e simples, e deve garantir o máximo de paralelismo com a máquina de ensaio de tração, pois os corpos de prova dependem destas características para que o ensaio apresente os melhores resultados possíveis.

Após o alinhamento do forno deve-se alocar o corpo de prova a máquina de tração fazendo uso dos alongadores e das porcas de união, sempre mantendo o corpo de prova de maneira mais axial possível. Para se garantir este paralelismo conecta-se aos alongadores dispositivos articulados que irão se posicionar nas pinças da máquina, como mostrado na figura

Se atentar ao detalhe de que os articuladores são de tamanhos distintos, sendo correto colocar o que possui maior alongador para cima, como mostra a figura abaixo.

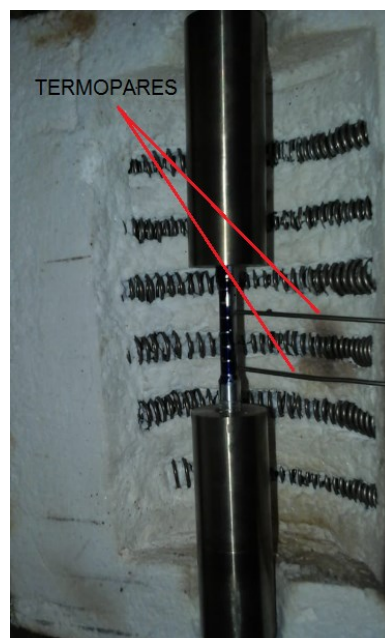


Atentar-se que o corpo de prova fique no centro do forno.

Nota-se que as uvas de conexão irão fazer o isolamento dos orifícios do forno e se necessário se faz os últimos ajustes de alinhamento, já que com o conjunto montado e anexado à máquina fica mais fácil de visualizar.

A próxima etapa é se colocar os termopares no corpo de prova para fazer o acompanhamento da temperatura e dependendo do equipamento, se fazer o levantamento das curvas Temperatura x tempo, como por exemplo o equipamento disponível no laboratório de máquinas térmicas da Universidade, o Datta Logger 3.

Os termopares devem ficar dispostos da seguinte maneira.  
( TERMOPARES TIPO K).





Os termopares devem ficar encostados no corpo de prova para medições mais precisas, devido a fatores de inercia térmica que ocorre durante o ensaio. Após isso pode fechar a porta do forno, cuidando para não tirar os termopares de posição.

Lembrando que os termopares colocados para aferição, vão dar uma diferença de aproximadamente 30°C a menos para a temperatura mostrada pelo controlador do forno, devido à disposição do termopar do forno, muito próximos as resistências.

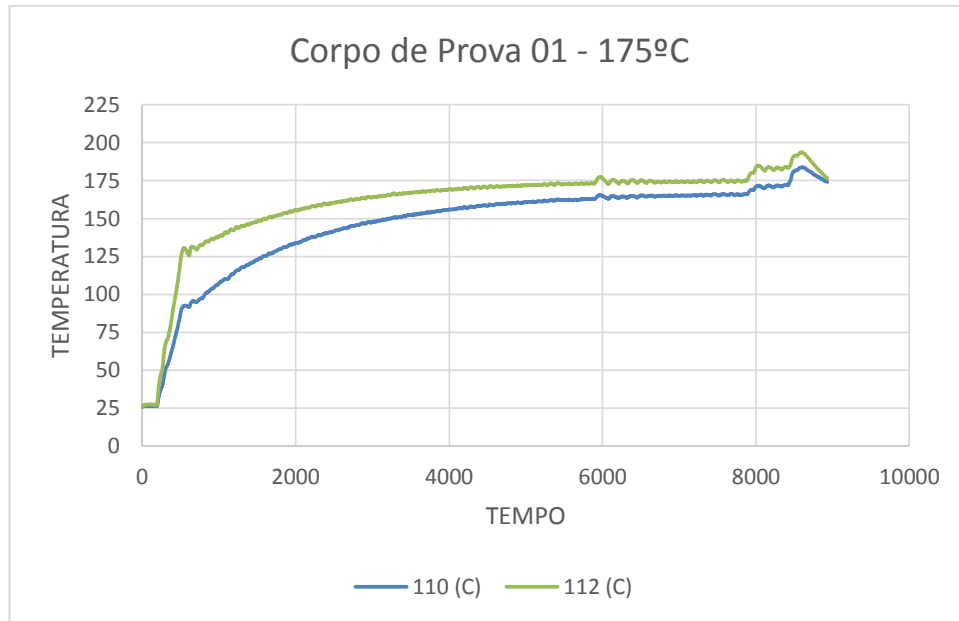
Alimentar o forno a uma tensão de 220V. ligar o disjuntor monofásico atrás do comando do forno. Programar o forno com parâmetros conforme tabela abaixo.

Ligar a máquina de ensaio de tração e o computador. Ligar o software de ensaio.

Antes de se iniciar os ensaios, se fez necessários aprender a programar o forno, e também realizar testes para se conhecer suas características e também como se comporta em várias faixas de temperatura, assim como, saber quanto tempo demora para atingir determinada temperatura e sua variação ao se adicionar uma carga térmica no seu interior, que neste caso são os corpos de prova e todos os equipamentos que se faz a necessidade de ocupar seu interior.

Mas em via de regra se deve deixar o corpo de prova por mais de uma hora após ele ter atingido a temperatura que foi estipulada, e esse tempo que demora para atingir a temperatura varia de acordo com o material, mas se faz necessário uns 40 minutos, então totalizando aproximadamente 2 horas de aquecimento. Quando o corpo de prova atingiu o tempo estimado, se deve erguer a temperatura de ensaio em 10°C por 10 minutos e na sequencia se iniciar o ensaio de tração.

Abaixo segue uma imagem mostrando esse processo.



Nota-se que do tempo 0 até 4000 segundos considera-se região de aquecimento, onde o corpo de prova está absorvendo energia térmica ainda, e após esse tempo ele tende a estabilizar, indo de 4000 a 8000 segundos praticamente estável, tendo uma variação reativamente baixa. E após 8000 segundos foi elevada a temperatura em 10°C por aproximadamente 600 segundos para se iniciar o ensaio.

Abaixo se observa como foi parametrizado o forno para a curva temperatura x Tempo mostrada acima. Lembrando que a temperatura de ensaio era de 175°C.

	Setpoint 01	Setpoint 02	Rampa Aquecimento	Rampa Aquecimento	Tempo Permanecia	Tempo Permanecia	Alarme
Função / Temperatura	SP01 °C	SP02 °C	RP01 °C/min	RP02 °C/min	PE01 min	PE02 min	AL1B -
175	165	175	30	5	120	10	3
275	265	275	30	5	120	10	3

Para a figura acima, temos:

Set Point 01: Temperatura estipulada para o ensaio menos 10°C ( $175 - 10 = 165^{\circ}\text{C}$ )

Set Point 02: Temperatura a se realizar o ensaio de tração a quente ( $175^{\circ}\text{C}$ )

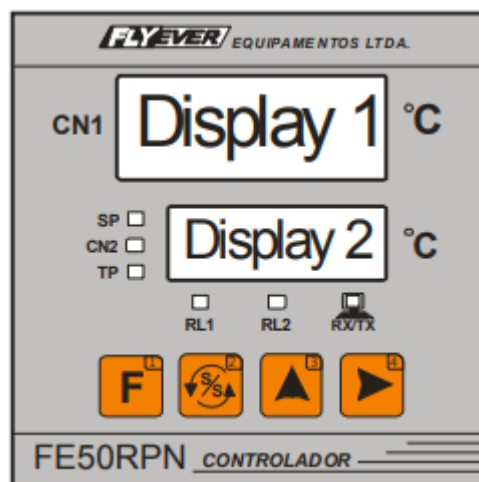
Rampa de aquec.: taxa com que se deseja elevar a temperatura, taxas muito elevadas tendem a ser mais difíceis para se controlar quando a temperatura se atinge valores próximos do desejado.

PE01: Tempo de permanência pôr do corpo de prova a temperatura do SetPoint 01, (mínimo: 100 minutos)


PE 02: Tempo de permanência após se eivar a temperatura em 10°C ( aprox. 10 min)


Programar os controladores para estabilizar a temperatura com uma diferença de 3°C, para baixo e para cima.


Quanto a programação do forno, se fez uso do manual para acertar os parâmetros, e eles estão listados na tabela acima, parâmetros estes retirado do manual da Flyever, fabricante do controlador FE50RPN, utilizado no forno da INTI, na qual tem sua interface mostrada abaixo.




Onde;

- A função  é usada para acessar os parâmetros externos de programação do aparelho. Esta tecla também é usada para sair do modo manual de ajuste de potência

- A função  é utilizada para iniciar o controle (start) ou selecionar os parâmetros externos e internos a serem programados.

- A função  é usada para incrementar/alterar os valores dos parâmetros a serem programados, habilitar/desabilitar os alarmes dos canais, alterar o modo de alarme, entre outros.

- A função  é utilizada para avançar dígito-a-dígito à direita, acessar a programação dos parâmetros internos do controlador e entrar no modo manual de ajuste de potência

- Led **RL1** aceso quando o relé 1 estiver ativado. De maneira análoga, o led **RL2** estará aceso quando o relé 2 estiver ativado.
- Led **RX/TX** aceso quando houver uma comunicação serial entre o aparelho e um PC compatível

Após a parametrização e os tempos e temperaturas atingidas, se realiza o ensaio de tração à quente do mesmo modo que se faz o ensaio de tração, fazendo uso do mesmo software se obtendo a curva Tensão x Deformação.

Ao termino do ensaio, quando romper o corpo de prova, com o auxílio de luvas térmicas se retira o corpo de prova para medições, e se colocar outro para novo ensaio, dando sequência no início do procedimento, o forno quando se desativado, fica salva a última parametrização, então fazendo a ativação do forno, pode se iniciar outro ensaio.

Modelo de corpo de prova a ser usinado para ensaio de tração à quente.

