



Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Campus Morro do Cruzeiro
Ouro Preto – Minas Gerais – Brasil



MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA METALÚRGICA

DESENVOLVIMENTO DE UMA CÂMARA CRIOGÊNICA DE BAIXO
CUSTO PARA A REALIZAÇÃO DE ENSAIOS MECÂNICOS DE
TRAÇÃO SOB CONDIÇÕES DE TEMPERATURA SUBZERO

Leonardo Barbosa Lazarini Silva Ribeiro

Ouro Preto, 23 de junho de 2022.

Leonardo Barbosa Lazarini Silva Ribeiro

Desenvolvimento de uma câmara criogênica de baixo custo para a realização de ensaios mecânicos de tração sob condições de temperatura subzero

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Metalúrgico.

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Lúcio de Faria

Ouro Preto, 23 de junho de 2022.

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

R484d Ribeiro, Leonardo Barbosa Lazarini Silva.

Desenvolvimento de uma câmara criogênica de baixo custo para a realização de ensaios mecânicos de tração sob condições de temperatura subzero. [manuscrito] / Leonardo Barbosa Lazarini Silva Ribeiro. - 2022. 36 f.: il.: color., gráf., tab.. + Diagrama.

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Faria.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Metalúrgica .

1. Aço - Tratamento térmico - Câmara Criogênica. 2. Aço - Tratamento térmico - Criogenia Controlada. 3. Baixa temperatura - Pesquisa - Temperaturas Subzero. 4. Aço - Aço ASTM A36. I. Faria, Geraldo. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 620.1

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALURGICA E DE
MATERIAIS



FOLHA DE APROVAÇÃO

Leonardo Barbosa Lazarini Silva Ribeiro

Desenvolvimento de uma câmara criogênica de baixo custo para a realização de ensaios mecânicos de tração sob condições de temperatura subzero

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Metalúrgico

Aprovada em 23 de junho de 2022

Membros da banca

DSc. Geraldo Lúcio de Faria - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
DSc. Rodrigo Rangel Porcaro - Membro (Universidade Federal de Ouro Preto)
Eng. MSc. Aparecida Silva Magalhães - Membro (Engenheira Autônoma)

Geraldo Lúcio de Faria, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 18/07/2022



Documento assinado eletronicamente por **Geraldo Lucio de Faria, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/07/2022, às 14:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0348734** e o código CRC **BCE5584D**.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um equipamento capaz de simular condições estáveis de temperaturas subzero para realização de ensaios mecânicos. Devido ao elevado custo de equipamentos comerciais com a mesma finalidade, foi proposta a criação de um aparato, a partir da utilização de componentes de baixo custo e de um software controlador. Após a bem sucedida confecção do equipamento, foram realizados testes que comprovaram o controle estável de temperaturas negativas até -170°C , com desvio máximo de $\pm 1,4^{\circ}\text{C}$ na isoterma. Foram também realizados ensaios de tração em um aço ASTM A36 nas temperaturas: ambiente, 0°C , -50°C e -100°C , com a finalidade de demonstrar a funcionalidade e a eficácia do equipamento na área de ensaios mecânicos dos materiais. Os resultados obtidos foram analisados e comparados com dados da literatura sobre o comportamento mecânico de diferentes aços em baixas temperaturas. O aparato viabiliza pesquisas e estudos em diversas áreas do conhecimento que necessitam simular condições estáveis em baixas temperaturas, como, por exemplo, avaliações de comportamento mecânico de materiais a serem utilizados em regiões de clima desfavorável.

Palavras-chave: Câmara Criogênica; Criogenia Controlada; Temperaturas Subzero; Ensaios de Tração; Aço ASTM A36.

ABSTRACT

This work presents the development of an apparatus capable of simulating stable conditions of subzero temperatures aiming to perform mechanical tests. Due to the high cost of commercial equipment for the same purpose, it was proposed to create an apparatus based on the use of low-cost components coupled to a supervisory software. After the successful apparatus manufacturing, tests were carried out, proving the stable control of negative temperatures down to -170°C , with a maximum isotherm deviation of $\pm 1.4^{\circ}\text{C}$. Tensile tests were also performed on ASTM A36 steel at the following temperatures: room temperature, 0°C , -50°C and -100°C in order to demonstrate the equipment functionality and effectiveness in the material mechanical testing area. The obtained results were analyzed and compared with experimental data, available in the technical literature, about mechanical behavior of different steel types at low temperatures. This apparatus enables research and studies in several knowledge areas that need to simulate stable conditions at low temperatures, for instance assessments about the mechanical behavior of materials to be used in regions with unfavorable weather.

Keywords: Cryogenic Chamber; Controlled Cryogenics; Subzero Temperatures; Tensile Test; A36 Steel.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|------------|--|----|
| Figura 3.1 | Esquema do princípio de funcionamento do equipamento desenvolvido (foco no circuito do gás nitrogênio) | 16 |
| Figura 3.2 | Fluxograma da arquitetura do equipamento desenvolvido..... | 17 |
| Figura 3.3 | (a) Representação esquemática do reservatório de nitrogênio líquido; (b) e da serpentina de cobre imersa em nitrogênio líquido para possibilitar as trocas térmicas entre o nitrogênio líquido e gasoso..... | 19 |
| Figura 3.4 | Vista superior esquemática do dispositivo eletrônico de controle, com a disposição dos componentes eletrônicos dentro da caixa de acrílico..... | 21 |
| Figura 3.5 | Captura de tela do supervisor durante teste a -25°C, versão: 1. Formulário do <i>Windows Forms</i> | 23 |
| Figura 3.6 | Visão esquemática da câmara fria onde é inserido o gás nitrogênio que mantém o corpo de prova na temperatura programada durante o ensaio: (a) câmara aberta; (b) câmara fechada..... | 24 |
| Figura 3.7 | a) Circuito eletrônico, b) Reservatório de nitrogênio líquido, c) Serpentina de cobre e d) Câmara Fria..... | 24 |
| Figura 3.8 | Dados experimentais - Temperaturas (°C) x Tempo (s) obtidos com a utilização do equipamento desenvolvido..... | 25 |
| Figura 3.9 | Geometria e dimensional dos corpos de prova de tração utilizados..... | 25 |
| Figura3.10 | Microestrutura do aço ASTM A36 - Ataque Nital 2%. (a) MO-200X, (b) MO-500x..... | 26 |
| Figura 4.1 | Curvas tensão x deformação obtidas para o aço ASTM A36, em tração, nas temperaturas ambiente, 0°C, -50°C e -100°C, a partir do equipamento desenvolvido..... | 28 |
| Figura 4.2 | Microfractografias das superfícies de fratura dos corpos de prova submetidos aos ensaios nas temperaturas: a) ambiente, b) de 0°C, c) de -50°C, d) de -100°C – MEV..... | 30 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|------------|---|----|
| Tabela 3.1 | Componentes utilizados na montagem do equipamento proposto..... | 18 |
| Tabela 3.2 | Especificação química do aço ASTM A36 (valores máximos em % em peso)..... | 26 |
| Tabela 3.3 | Especificações das propriedades mecânicas em tração do aço A36 à temperatura ambiente..... | 26 |
| Tabela 4.1 | Propriedades mecânicas do aço ASTM A36 submetidas a ensaios de tração nas temperaturas ambiente, 0°C, -50°C e -100°C, a partir do equipamento desenvolvido..... | 28 |

LISTA DE SIGLAS

API – *American Petroleum Institute*

ARBL – Alta Resistência Baixa-Liga

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

ATX - *Advanced Technology Extended*

Bar – Unidade de Pressão

CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

CP – Corpo de Prova

DEMET – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

LTM – Laboratório de Tratamento Térmicos e Microscopia Óptica

MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura

MHZ – Megahertz

MO – Microscópio Óptico

NBR – Norma Brasileira

PLA – Poliacido Láctico

USB - *Universal Serial Bus*

3D – Tridimensional

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 11 |
| 2 OBJETIVOS..... | 14 |
| 2.1 Objetivo Geral..... | 14 |
| 2.2 Objetivos Específicos..... | 14 |
| 3 MATERIAIS E MÉTODOS..... | 15 |
| 3.1 Arquitetura do Equipamento..... | 15 |
| 3.2 Componentes do Equipamento..... | 17 |
| 3.3 Ensaios de Tração a Frio para Validar o Funcionamento do Equipamento..... | 25 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 28 |
| 5 CONCLUSÕES..... | 32 |
| 6 SUJESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 33 |
| 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 34 |

1 INTRODUÇÃO

No contexto atual, em que há pesquisas que indicam uma futura escassez das reservas de petróleo e de gás natural em regiões de mais fácil exploração, as grandes empresas têm se interessado cada vez mais pelo grande potencial de obtenção desses recursos no Ártico. Estima-se que cerca de 25% das reservas globais de hidrocarbonetos estão localizadas acima do Círculo Polar Ártico (TUBEX; MINNEBRUGGEN; WAELE, 2015). Nesses locais, o clima desfavorece os processos de extração e transporte de tais recursos, tendo em vista que as temperaturas regionais variam entre +30°C e -70°C, dependendo do local e da época do ano (TUBEX; MINNEBRUGGEN; WAELE, 2015).

Na exploração e no transporte dos hidrocarbonetos, aços especiais são utilizados, haja vista a necessidade de se obter uma boa relação entre resistência mecânica e tenacidade, para que se garanta a eficiência e a segurança das operações. Isso se dá, porque as baixas temperaturas desses ambientes podem interferir nas características mecânicas de tubos de exploração e de condução de hidrocarbonetos, máquinas e demais componentes utilizados e manufaturados com aços (POLETSKOV et al., 2019; SHIRYAEV et al., 2018; BITYUKOV et al., 2010).

Nesse contexto, diversos autores têm se preocupado em caracterizar o comportamento mecânico de diferentes tipos de aços em baixas temperaturas, visando garantir o seu bom desempenho em aplicação (POLETSKOV et al., 2019; SHIRYAEV et al., 2018; TUBEX; MINNEBRUGGEN; WAELE, 2015; YAN et al., 2014; AKSELSEN; OSTBY; NYHUS, 2012; CZARKOWSKI et al., 2011; FASSINA et al., 2011a e 2011b; BITYUKOV et al., 2010; TOMOTA; XIAI; INOUE, 1998). Por exemplo, Yan et al (2014) avaliaram o comportamento mecânico em tração de dois tipos de aços em baixas temperaturas, um deles é o S690, um aço de baixa resistência mecânica e composição básica, e o outro um HSS S460, um aço de elevada resistência mecânica. Os autores realizaram ensaios de tração em temperaturas entre +30°C e -80°C, nos quais perceberam que, com a diminuição da temperatura, em geral, os módulos de elasticidade dos aços aumentaram, assim como os seus limites de escoamento e de resistência à tração. Os autores destacaram ainda que o comportamento dos dois aços foi distinto. O aço S690 apresentou-se mais susceptível aos efeitos da diminuição da temperatura. Ao se comparar parâmetros de ensaios de tração medidos nas temperaturas de +30°C e -80°C, os pesquisadores perceberam aumentos de 13% e de 8% nos limites de

escoamento dos aços S690 e HSS S460, respectivamente, assim como de 13% e de 9% nos seus limites de resistência.

Tubex, Minnebruggen e Waele (2015) fizeram um estudo para avaliar o efeito de baixas temperaturas no comportamento mecânico em tração de aços para aplicação na indústria de óleo e gás. Os autores coletaram dados de ensaios de tração subzero, realizados em aços API 5L X80 e API 5L X65, publicados previamente por outros autores, como Heier, Østby e Nyhus (2013) e Akselsen, Østby e Nyhus (2012), os quais fizeram uma análise crítica dos resultados. Segundo Tubex, Minnebruggen e Waele (2015), para o aço API 5L X80, ao se comparar ensaios de tração realizados nas temperaturas de 0°C e -60°C, pôde-se observar um aumento no limite de escoamento de 510MPa para 530MPa, respectivamente, assim como um aumento no alongamento total de 8% para 9%, respectivamente. Segundo os autores, nas duas temperaturas investigadas, o modo de fratura foi dúctil.

Ao avaliarem os dados obtidos para o aço API 5L X65, Tubex, Minnebruggen e Waele (2015) verificaram que, para todas as temperaturas de ensaio (0°C, -30°C, -60°C e -90°C), houve a ocorrência de patamar de escoamento descontínuo; observou-se também que, quanto menor a temperatura de ensaio, maior foi a extensão do patamar. Eles verificaram, ainda, que, com a diminuição da temperatura, houve aumento significativo dos limites de escoamento e de resistência à tração, assim como do alongamento total (de 11% a 0°C e de 15% a -90°C). Tubex, Minnebruggen e Waele (2015) tentaram fazer uma avaliação estatística dos dados para estabelecer alguma relação matemática que traduzisse o efeito de baixas temperaturas sobre os principais parâmetros avaliados em ensaios de tração, entretanto eles concluíram que o volume de dados experimentais disponíveis sobre o comportamento em tração de aços em temperaturas subzero é escasso; desse modo, os autores defendem a necessidade de que um maior volume de investigações deve ser feito com essa finalidade.

Outros trabalhos poderiam ser citados com os mesmos objetivos de caracterizar e melhorar o desempenho mecânico de diversos tipos de aços em baixas temperaturas, desde aços carbono, passando, ainda, pelos de alta resistência e baixa liga, além dos aços inoxidáveis (CZARKOWSKI *et al.*, 2011; FASSINA *et al.*, 2011a e 2011b; TOMOTA; XIAI; INOUE, 1998). Nesse contexto, para que essa linha de pesquisa possa ser desenvolvida, é imprescindível que se consiga realizar ensaios mecânicos em condições estáveis de baixa temperatura, como por exemplo: ensaios de tração, fadiga e tenacidade à fratura. Alguns equipamentos comerciais estão disponíveis no mercado, porém são de

elevado custo, o que na maioria dos casos torna inviável o desenvolvimento dessas frentes de estudo.

Para ampliar e viabilizar as pesquisas sobre o comportamento mecânico de aços e outros materiais em baixas temperaturas, surgiu a necessidade de desenvolver um equipamento capaz de atingir temperaturas subzero e de simular de forma estável condições semelhantes às dos ambientes mencionados. Nesse contexto, este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma câmara criogênica automatizada, a qual pode ser acoplada a máquinas universais de ensaios mecânicos, possibilitando a realização de diversos tipos de ensaios em temperaturas subzero, como tração, fadiga e tenacidade à fratura. A fim de mostrar a sua eficiência e de validar o funcionamento do dispositivo desenvolvido, o mesmo foi acoplado a uma máquina universal de ensaios servo-hidráulica. Em seguida foram executados ensaios de tração em temperaturas subzero em um aço do tipo ASTM A36. Assim, este trabalho tem como objetivo geral apresentar o princípio de funcionamento do equipamento, bem como exemplos bem-sucedidos de sua utilização na execução de ensaios de tração subzero em aço ASTM A36.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um equipamento de baixo custo que possibilite a realização de ensaios mecânicos de tração e de outros tipos de ensaios em temperaturas subzero.

2.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver um circuito eletrônico no interior de uma estrutura de proteção, de arquitetura simples;
- Desenvolver uma interface de comunicação entre computador e circuito eletrônico;
- Desenvolver um circuito de resfriamento ligado ao circuito eletrônico;
- Realizar ensaios mecânicos de tração em um aço ASTM A36, a fim de se avaliar o comportamento mecânico desse material nas condições de ensaios estabelecidas: 0°C, -50°C e -100°C;
- Comparar o comportamento mecânico do aço ASTM A36 ensaiado em baixas temperaturas com o comportamento de outros aços ao carbono, quando submetidos a baixas temperaturas, conforme descrito pela literatura, comprovando, assim, a eficiência do dispositivo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Arquitetura do Equipamento

A arquitetura básica do equipamento foi desenvolvida considerando-se as seguintes premissas: 1) deve ser um dispositivo de baixo custo; 2) deve ser um dispositivo versátil, que se adapte facilmente a diferentes geometrias de corpos de prova e que envolva por completo a região útil do mesmo; 3) deve ser de simples acoplamento em máquinas universais de ensaios mecânicos; 4) deve garantir uma temperatura homogênea e estável durante todo o tempo de realização do ensaio mecânico pretendido; 5) deve ser um sistema automatizado, que faça uso, portanto, de sensores e de dispositivos eletrônicos, os quais permitam o seu controle por um software instalado em um microcomputador.

Uma vez estabelecidas essas premissas, a primeira etapa de desenvolvimento deu-se com o *design* do modelo físico de funcionamento do equipamento, com a finalidade básica de promover trocas térmicas entre materiais em diferentes estados físicos. A câmara criogênica foi concebida como um recipiente isolante térmico fechado, por onde circularia um gás veículo responsável por controlar e manter estável a sua temperatura. Para atender o objetivo de garantir ambientes estáveis em temperaturas subzero, esse gás veículo precisaria chegar à câmara já arrefecido. O controle do seu fluxo para dentro da câmara seria a variável de controle para definição da temperatura interna do ambiente. Com esse intuito, concebeu-se a ideia de que a temperatura do gás veículo poderia ser satisfatoriamente reduzida, passando-o por um ambiente previamente refrigerado por nitrogênio líquido (a -196°C) onde ocorreriam as trocas térmicas entre o gás veículo e o ambiente resfriado.

Nesse contexto, o gás veículo, ou condutor térmico, foi definido a partir de características tais como: ser um gás de custo relativamente baixo, ter boa disponibilidade no mercado, possuir temperatura de solidificação inferior a -196°C , apresentar boa condutividade térmica. Determinou-se como gás veículo o próprio gás nitrogênio (N_2) de pureza analítica, o qual possui temperatura de solidificação de -210°C na pressão de 1atm. Uma vez definido o gás condutor, arquitetou-se o sistema de refrigeração da câmara, da seguinte forma: o gás nitrogênio é conduzido para o interior de uma serpentina de cobre, que permanece mergulhada em nitrogênio líquido, como mostra a Figura 3.1; nessa fase, há troca térmica entre o nitrogênio gasoso e a parede externa da serpentina. Portanto, o gás nitrogênio é arrefecido no interior da serpentina para ser, posteriormente, conduzido para a câmara fria,

onde o corpo de prova (CP) está inserido. Com o objetivo de satisfazer à premissa de automação e controle automático da temperatura da câmara, definiu-se que um termopar deveria ser posicionado dentro da câmara fria, conectando-o a um circuito eletrônico de aquisição de dados e controle. Esse circuito eletrônico, por sua vez, controla por meio de uma válvula pneumática (sistema abre-fecha) o volume de gás nitrogênio que vai entrar na serpentina por unidade de tempo, fazendo assim o ajuste da temperatura interna da câmara.

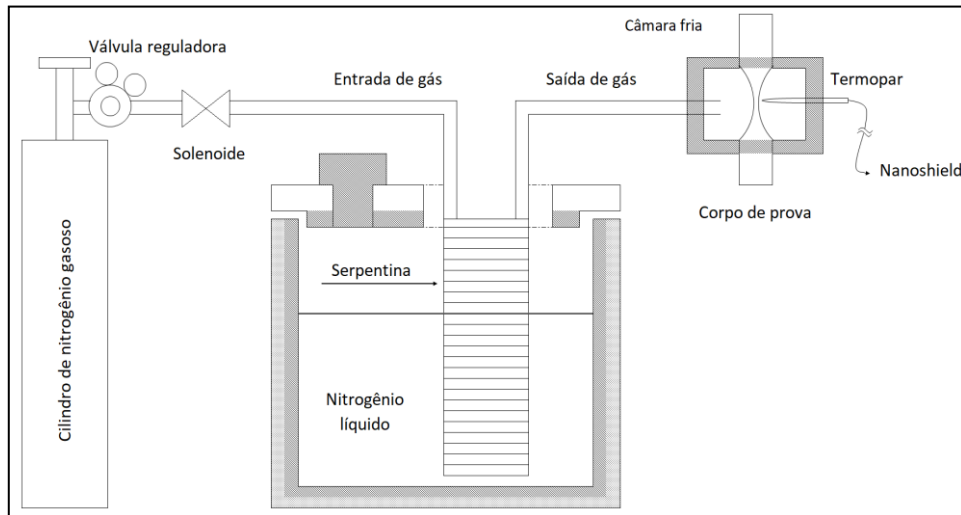


Figura 3.1 - Esquema do princípio de funcionamento do equipamento desenvolvido (foco no circuito do gás nitrogênio)

Deve-se destacar que, durante a realização de ensaios mecânicos subzero com o cilindro de gás nitrogênio aberto e o reservatório de nitrogênio líquido abastecido, a pressão no regulador de gás nitrogênio deve ser ajustada para 1bar. O dispositivo deve estar ligado à rede elétrica e conectado ao computador/supervisório. No supervisório, seleciona-se a temperatura desejada para a câmara e se dá o comando para iniciar. O dispositivo eletrônico de controle libera a saída de gás para a câmara fria até alcançar a temperatura configurada. Desse modo, uma vez alcançada essa temperatura, mediante recebimento contínuo de leituras do termopar pelo dispositivo de controle, um relé passa a controlar o funcionamento da válvula pneumática, a qual ajusta o fluxo de gás nitrogênio para o interior da câmara, mantendo a temperatura programada estável durante toda a execução do ensaio.

Uma característica que torna a arquitetura proposta versátil é a capacidade de a câmara fria ser modulada, ou seja, ela é facilmente conectada e desconectada da linha de gás veículo, assim como do dispositivo de controle. Isso faz com que diferentes geometrias de câmaras possam ser facilmente fabricadas de forma personalizada para o tipo de ensaio,

corpo de prova ou mesmo modelo de máquina universal, atendendo, assim, às premissas 2 e 3 pré-estabelecidas. Maiores detalhamentos sobre a manufatura da câmara são apresentados na subseção 3.2.

Considerando a arquitetura proposta para a realização de ensaios mecânicos em baixas temperaturas, uma vez que o corpo de prova esteja no interior da câmara e a temperatura desejada tenha sido alcançada, deve-se esperar o tempo de encharque, que será função das dimensões da câmara e do corpo de prova utilizado, para que só então se inicie o ensaio. Todo o sistema, assim como o dispositivo eletrônico de controle, deve permanecer ligado até o fim do ensaio. A Figura 3.2 mostra, didaticamente, a arquitetura do equipamento descrita em um diagrama de blocos. Os detalhes de cada um dos componentes são descritos também na subseção 3.2.

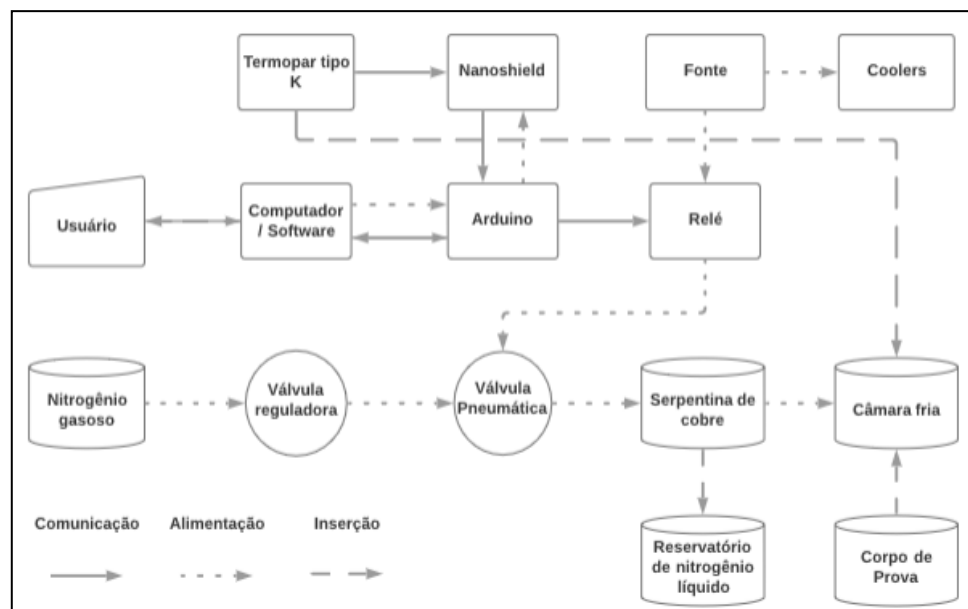


Figura 3.2 - Fluxograma esquemática dos componentes do equipamento desenvolvido

3.2 Componentes do Equipamento

A construção do equipamento mostrou-se economicamente viável devido à utilização de materiais que, em grande parte, são de fácil acesso e de baixo custo. A Tabela 3.1 apresenta todos os componentes utilizados. Em sequência, a concepção e o detalhamento a respeito dos itens mais relevantes para este trabalho são apresentados.

Tabela 3.1 - Componentes utilizados na montagem do equipamento proposto

| | Quantidade | Item |
|---------------------------------|------------------------------|---|
| Interface | 1u | Computador ou Laptop com Windows XP ou superior, framework 4.0 ou superior, porta USB 2.0 ou superior, aplicativo responsável pela interface e comunicação com o circuito instalado |
| Circuito Eletrônico | 1u | Caixa de acrílico |
| | 2u | Cooler 12V |
| | 1u | Chave duas posições 2A |
| | 1u | Fonte ATX |
| | 1u | Placa de circuito impresso “ilha” de tamanho 10x10cm |
| | 1u | Cabo USB/MiniUSB |
| | 1u | Placa Arduino Nano |
| | 1u | Placa Nanoshield Termopar MAX31856 |
| | 1u | Termopar do tipo K |
| | 1,5m | Cabos de compensação para termopares do tipo K |
| | 1u | Módulo relé 5v 10A |
| | 1u | Válvula solenoide pneumática 12V, normal fechada, conexões de ¼” |
| Circuito de Resfriamento | 4u | Conexões pneumáticas de engate rápido de ¼” |
| | 1,5m | Mangueiras pneumáticas de ¼” |
| | 1u | Serpentina de cobre |
| | 1u | Isolante térmico tubular |
| | 1u | Caixa térmica de 12 litros |
| | Depende da duração do ensaio | Nitrogênio líquido |
| | 1u | Válvula reguladora de gás nitrogênio |
| | 1u | Cilindro de nitrogênio gasoso |
| | 1u | Regulador de alta pressão para nitrogênio gasoso |

O equipamento proposto é constituído de alguns dispositivos periféricos essenciais para o seu funcionamento. Todos esses dispositivos também foram projetados de forma a viabilizar a realização de ensaios mecânicos de forma estável em baixa temperatura. Como já apresentado na subseção 3.1, a arquitetura do equipamento exigiu o desenvolvimento dos seguintes dispositivos periféricos: a) reservatório de nitrogênio líquido adaptado para trocas térmicas com o nitrogênio gasoso; b) serpentina de cobre para colocar o nitrogênio gasoso em contato indireto com o nitrogênio líquido; c) dispositivo eletrônico de controle; d)

supervisório para interface entre o dispositivo eletrônico de controle e o usuário; e) câmara fria que envolva os corpos de prova durante os ensaios mecânicos; neste trabalho restringiu-se a ilustração apenas à execução de ensaios de tração.

O reservatório de nitrogênio líquido, mostrado na Figura 3.3-a, consiste em uma caixa térmica de 12 litros. As paredes da caixa térmica são ocas e, originalmente, preenchidas com uma camada de isopor. Para fins de melhorar a sua eficiência térmica, as suas paredes foram preenchidas com uma camada extra de fibra de alumina e cimento refratário. A face interna de sua tampa foi revestida com uma camada de isopor. Ainda na tampa da caixa, dois furos foram feitos: um para inserção da serpentina de cobre e o outro para reposição de nitrogênio líquido, quando se fizesse necessário. Ambos os orifícios foram feitos com geometria circular com 40mm de diâmetro. Durante os ensaios, o furo que recebe o nitrogênio líquido permanece fechado com uma tampa feita de isopor.

Para a manufatura da serpentina de cobre, foi utilizado um tubo de 3/8' de diâmetro o qual foi enrolado no formato de um solenoide com diâmetro interno de 15mm, como mostra a Figura 3.3-b. Destacam-se, ainda, que a serpentina foi conformada com um total de 27 espiras concêntricas e que, nas extremidades do tubo de cobre, foram soldados engates para a conexão das mangueiras de entrada e saída do nitrogênio gasoso.

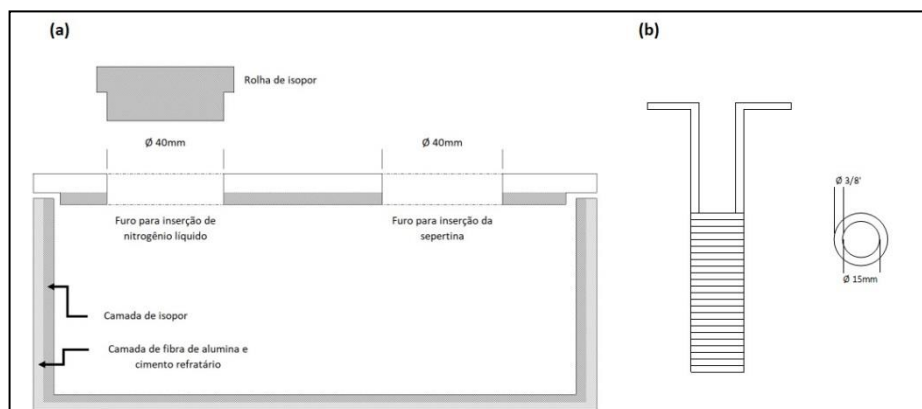


Figura 3.3 - (a) Representação esquemática do reservatório de nitrogênio líquido; (b) e da serpentina de cobre imersa em nitrogênio líquido para possibilitar as trocas térmicas entre o nitrogênio líquido e gasoso

Um dispositivo eletrônico de aquisição de dados e controle do equipamento foi integralmente planejado e desenvolvido com o objetivo de, instantaneamente, receber o sinal elétrico do termopar instalado no interior da câmara fria e convertê-lo para valores legíveis da grandeza temperatura. Em tempo real, o dispositivo comunica-se com um

microcomputador que registra os dados de temperatura em função do tempo, comparando-os com o *set point* definido pelo usuário. Por meio de um software supervisor, para cada instante de tempo, os casos em que a temperatura medida na câmara seja maior do que o *set point*, o *software* envia um comando ao dispositivo eletrônico para a abertura da válvula pneumática, liberando fluxo de gás para a câmara. Caso a temperatura da câmara seja igual, ou menor do que a desejada pelo usuário, o dispositivo eletrônico cessa o fluxo de gás nitrogênio. Esse monitoramento contínuo do sinal enviado pelo termopar e os sucessivos e precisos comandos de abre-fecha da válvula pneumática garantem a estabilidade da temperatura da câmara e, conseqüentemente, do corpo de prova a ser ensaiado.

Todo o aparato eletrônico utilizado na manufatura do dispositivo de controle foi montado dentro de uma caixa de acrílico fechada. O objetivo desse procedimento foi proteger os componentes e os circuitos eletrônicos de uma possível condensação de vapor de água nas mangueiras de transporte do gás refrigerado, o que pode acontecer durante a realização dos ensaios. A Figura 3.4 mostra, de forma esquemática, a disposição dos componentes eletrônicos utilizados no interior da caixa. Destacam-se alguns orifícios feitos em pontos estratégicos da caixa, para: a) instalação de engates rápidos para conexão de mangueiras que levam gás nitrogênio até a válvula pneumática que, quando aberta, coleta esse gás e o direciona para a serpentina de cobre; b) passagem do cabo MicroUSB para comunicação com o microcomputador; c) passagem do cabo de compensação para termopar do tipo K; d) passagem do cabo de alimentação de energia; e) instalação de chave liga/desliga do dispositivo; f) instalação de dois *coolers* próximo à válvula pneumática, para dissipar o calor gerado por ela durante a sua utilização.

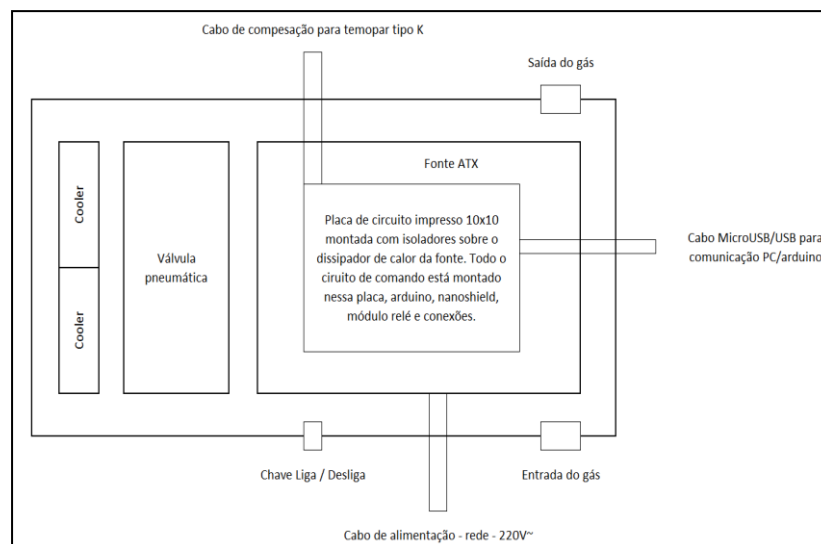


Figura 3.4 - Vista superior esquemática do dispositivo eletrônico de controle, com a disposição dos componentes eletrônicos dentro da caixa de acrílico

O circuito eletrônico necessita de tensões de alimentação de 12V e 5V. Para atender a essa demanda, foi utilizada uma fonte chaveada ATX de 250W. O circuito da fonte foi desmontado de sua carcaça original e remontado dentro da caixa de acrílico para fins de otimização do espaço. Como dito anteriormente, todo o sistema depende de uma central eletrônica que colete os dados de temperatura, receba e envie informações para o supervisor via USB, além de fazer o controle da válvula solenoide a qual libera o gás nitrogênio. Para tal, foi utilizado um Arduino Nano, que é uma placa de prototipagem *open source*, o qual contém um microcontrolador de baixo custo e de fácil utilização. Ele opera em 5V e possui um *clock speed* de 16MHZ, o que permite uma comunicação rápida com o supervisor e detecções ultrarrápidas de alterações nas portas digitais que fazem tanto a leitura de temperatura quanto o acionamento de periféricos, como a válvula solenoide. Porém, o Arduino Nano não possui um sistema adequado para leitura de termopares; por esse motivo foi necessário instalar um circuito capaz de converter a informação analógica do termopar em digital. A placa utilizada para essa função foi a Nanoshield Termopar, que foi implementada com circuito integrado MAX31856, o qual possui, segundo o *datasheet* do fabricante (MAXIM, 2020), compensação de junta fria, 14bits de resolução e detecção de curto circuito ou rompimento no termopar.

Como a temperatura na câmara fria pode chegar a -170°C no equipamento desenvolvido, o termopar do tipo K mostrou-se adequado. O mesmo foi conectado à placa Nanoshield por meio de um cabo de compensação para termopares do tipo K. Como o Arduino Nano também não possui potência suficiente para alimentação da válvula solenoide

que libera o gás nitrogênio para a serpentina, houve a necessidade de que o comando dessa válvula fosse feito por meio de um módulo relé, como descrito de forma esquemática na Figura 3.2. Caso a pressão no circuito pneumático esteja desregulada, isso pode resultar em: a) desperdício de nitrogênio; b) controle de temperatura ineficiente; c) danificação da câmara fria; d) acidentes, caso a parte da serpentina que fica dentro da câmara fria se solte no decorrer do ensaio. Portanto, durante os ensaios, é necessário que a pressão no circuito permaneça entre 0 e 2bar. Para esse controle, foi utilizada uma válvula reguladora de alta pressão para gás nitrogênio.

O aplicativo de interface entre o usuário e o circuito foi desenvolvido pelos próprios autores do presente trabalho como um formulário do *Windows Forms*. Esse tipo de aplicação foi escolhido tanto pela interface amigável com o usuário final quanto pela versatilidade, uma vez que pode ser instalado em qualquer microcomputador com versão Windows 7 ou superior.

Já a utilização do supervisor é descrita, de forma sequencial, ou seja, apresentam-se passo a passo os procedimentos adotados: a) com o aparato eletrônico ligado, o usuário conecta a placa Arduino na porta USB do computador, seleciona a porta desejada e clica em conectar no canto superior esquerdo; b) há um campo especificado para seleção da temperatura desejada que, inicialmente, aparece automaticamente configurada para 20°C. O usuário pode alterar esse número digitando o valor desejado e clicando no botão “Alterar Valor”; c) a coleta de dados medidos pelo termopar e o controle da válvula pneumática são iniciados após o usuário clicar no botão “Iniciar”; d) com os passos anteriores realizados, a tabela no canto superior esquerdo da tela começa a registrar os valores de temperatura e o tempo decorrido. A taxa de aquisição de dados do supervisor desenvolvido é de 2 (duas) coletas por segundo. Um gráfico que mostra a temperatura (em °C) em função do tempo é atualizado em tempo real na janela à direita. A Figura 3.5 apresenta uma captura de tela da interface do supervisor desenvolvido.

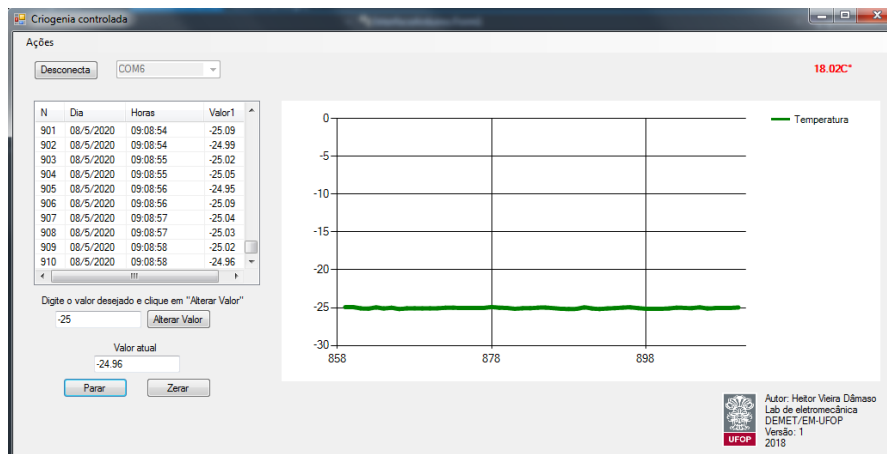


Figura 3.5 - Captura de tela do supervisor durante teste a -25°C , versão: 1. Formulário do *Windows Forms*

A câmara fria foi confeccionada a partir de uma caixa bipartida, que foi impressa por uma impressora 3D a partir de um material polimérico (PLA). O equipamento permitiu manufaturar diversos tipos de caixas com diferentes tamanhos. Vale ressaltar a facilidade com a qual a caixa é acoplada e desacoplada aos outros componentes que a ela se conectam, inclusive ao corpo de prova, admitindo-se a realização de inúmeros ensaios com a mesma câmara de forma rápida e eficiente. As dimensões da caixa foram definidas em função da geometria e das dimensões do corpo de prova que foram utilizadas neste trabalho. Para atender às especificações do CP em questão, a geometria da caixa bipartida, como mostra a Figura 3.6, baseou-se em dois cortes, um no topo e outro na base; além de duas entradas circulares nas faces laterais opostas. Uma dessas entradas é localizada no centro do comprimento da caixinha, nela está conectado o termopar, que fica em contato com o CP durante a realização dos ensaios, monitorando a sua temperatura. O termopar é colocado para dentro da câmara fria manualmente, até que tenha interceptado a superfície do CP. Já na abertura localizada mais acima na caixa conecta-se o tubo de cobre que transporta o gás resfriado. A densidade do gás nitrogênio arrefecido é maior que a dos gases atmosféricos em temperatura ambiente, isso faz com que ele desça para o fundo da câmara fria, por essa razão o furo para entrada do gás foi feito na parte superior do compartimento. Os cortes no topo e na base são responsáveis pela saída das cabeças do corpo de prova que são conectadas à máquina de ensaios. O revestimento interno possui a função de isolante térmico, desse modo, todas as faces internas da caixa foram feitas com isopor, tendo 5mm de espessura nas faces superior e inferior e 10mm nas faces laterais, o que garantiu uma boa eficiência do isolamento.

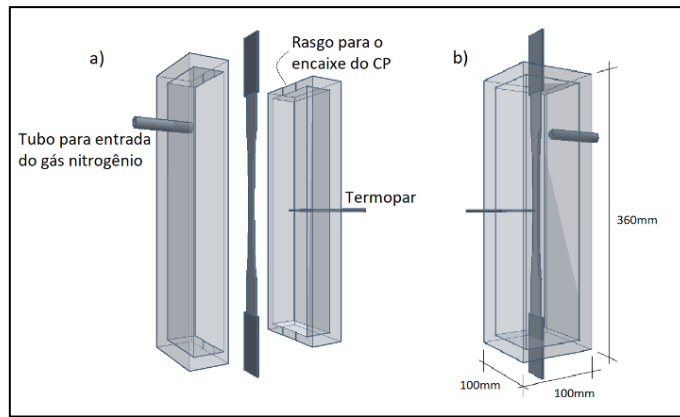


Figura 3.6 - Visão esquemática da câmara fria onde é inserido o gás nitrogênio que mantém o corpo de prova na temperatura programada durante o ensaio:
 (a) câmara aberta; (b) câmara fechada

Por fim, a Imagem 3.7 ilustra a fotografia dos componentes desse equipamento:

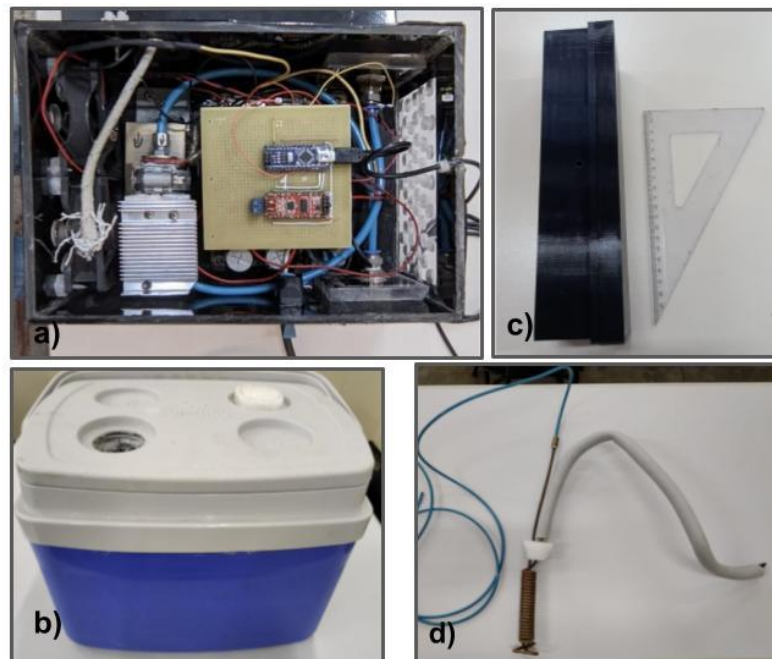


Figura 3.7 – a) Circuito eletrônico, b) Reservatório de nitrogênio líquido, c) Câmara fria e d) Serpentina de cobre.

A estabilidade da temperatura dentro da câmara é mostrada na Figura 3.8, com desvio médio, no patamar isotérmico, inferior a $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ em testes com as temperaturas de 0°C , -50°C e -100°C . Para fins de verificação dos limites máximos do equipamento, foi realizado um teste a -170°C e o resultado apresentado foi um desvio médio de $\pm 1,4^{\circ}\text{C}$ no patamar isotérmico.

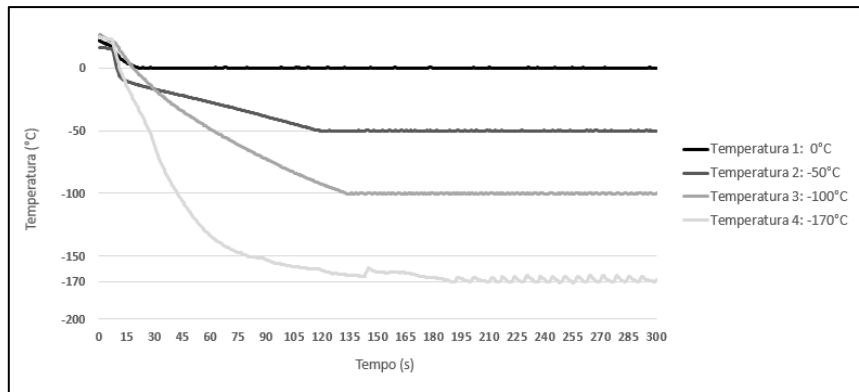


Figura 3.8 - Dados experimentais - Temperaturas (°C) x Tempo (s) obtidos com a utilização do equipamento desenvolvido

Foram utilizadas as regulagens de pressão de gás em: a) 0,3bar para a temperatura 1; b) 0,6bar para a temperatura 2; c) 1bar para temperatura 3 e d) 2bar para a temperatura 4.

3.3 Ensaio de Tração a Frio para Validar o Funcionamento do Equipamento

Para a validação do funcionamento do equipamento, foram utilizadas chapas de um aço estrutural do tipo ASTM A36, regulamentado pela norma NBR 6650 (ABNT, 2014). Tais chapas foram gentilmente fornecidas pela empresa Gerdau-Ouro Branco, as quais já se apresentavam usinadas com geometrias de corpos de prova de tração de seção retangular e dimensional, como sugerido pela norma ASTM E8M (ASTM, 2016) e ilustrada na Figura 3.9.

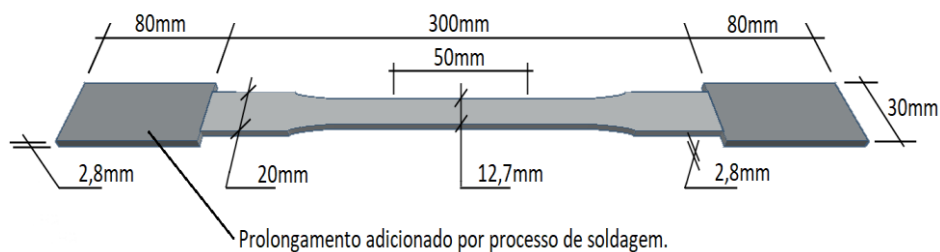


Figura 3.9 - Geometria e dimensional dos corpos de prova de tração utilizados

Fonte: Dados da pesquisa (2022)

O aço A36 é um aço baixo carbono comum estrutural, cuja composição química é relativamente simples, considere-se, ainda, que os limites máximos de alguns elementos químicos são controlados por norma. A Tabela 3.2 apresenta os valores máximos permitidos para o aço A36, de acordo com a norma NBR 6650 (ABNT, 2014), assim como a Tabela 3.3

apresenta as suas propriedades mecânicas típicas medidas em tração à temperatura ambiente (LUZ, 2017). O aço ASTM A36, em questão, foi processado a quente e apresenta uma microestrutura bandeada composta por ferrita e perlita (PARIS; MULAZZANI; PARIS, 2012). A Figura 3.10, por sua vez, apresenta essa microestrutura, a qual foi analisada por meio do Microscópio Óptico (MO) do Laboratório de Tratamentos Térmicos e Microscopia Óptica (LTM), do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (DEMET), da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

Tabela 3.2 - Especificação química do aço A36 (valores máximos em % em peso)

| | Carbono | Cobre | Silício | Fósforo | Enxofre |
|-------------------|---------|-------|---------|---------|---------|
| NBR 6650/ASTM A36 | 0,26 | 0,20 | 0,4 | 0,04 | 0,05 |

Fonte: Adaptado de ABNT (2014)

Tabela 3.3 - Especificações das propriedades mecânicas em tração do aço ASTM A36 à temperatura ambiente

| | Limite de Escoamento Mínimo (MPa) | Limite de Resistência (MPa) | Alongamento Mínimo (%), $L_0=200\text{mm}$ | Alongamento Mínimo (%), $L_0=50\text{mm}$ |
|-------------------|-----------------------------------|-----------------------------|--|---|
| NBR 6650/ASTM A36 | 250 | 400-550 | 20 | 21 |

Fonte: Adaptado de LUZ (2017)

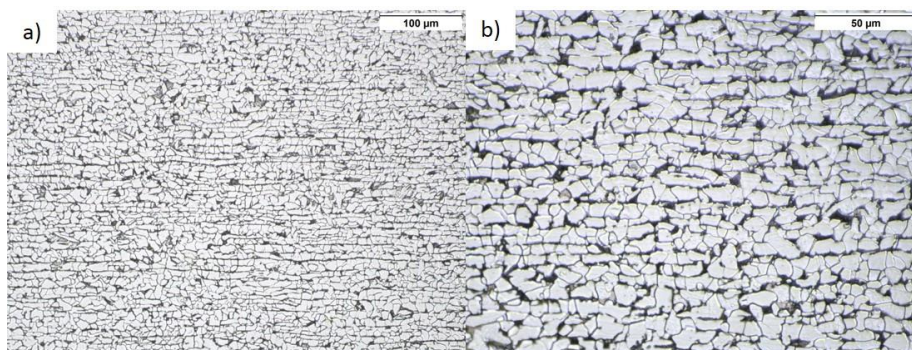


Figura 3.10 - Microestrutura do aço A36 - Ataque Nital 2%. (a) MO-200X, (b) MO-500x

Fonte: Dados da pesquisa (2022)

Para a realização dos ensaios de tração, recomenda-se que toda a região útil do corpo de prova, assim como as suas cabeças, considerando-se as dimensões originais recomendadas pela norma ASTM E8M (ASTM, 2016), estejam no interior da câmara, garantindo-se equilíbrio térmico ao longo de todo o CP. Essa orientação se faz necessária, pois, segundo a literatura, há uma tendência geral de que, com a diminuição da temperatura, ocorra um aumento do limite de escoamento, o que pode acarretar deformação plástica preferencial nas cabeças, caso as cabeças originais do corpo de prova fiquem à temperatura ambiente e não exista uma expressiva diferença entre a sua área de seção transversal e a área da região útil.

Duas alternativas são recomendadas para evitar essa possibilidade: 1) prolongar as cabeças dos corpos de prova por meio da soldagem de uma chapa de um aço de elevada resistência mecânica com maior área de seção transversal; 2) usinagem das cabeças dos corpos de prova com um prolongamento no seu comprimento, além do especificado pela norma, considerando um aumento da largura da região a ser acoplada nas garras da máquina de ensaio. Neste trabalho, optou-se pela solução (1). De tal modo, foi soldada uma chapa em cada uma das extremidades dos corpos de prova utilizando a soldagem por eletrodo revestido, sendo o consumível de aço carbono comum. A Figura 3.8 ilustra o prolongamento. Essas soldagens permitiram um aumento de 50% da área de seção transversal das cabeças dos CPs, isso garantiu que: a) o corpo de prova permanecesse em toda a sua extensão dentro da câmara fria; b) a deformação plástica ocorresse apenas na região útil; e c) a validação do ensaio.

No presente trabalho, o aço ASTM A36 foi ensaiado em tração nas temperaturas ambiente, 0°C, -50°C e -100°C. Os valores de limite de escoamento, limite de resistência, deformação total e redução de área foram calculados por meio de médias aritméticas dos resultados obtidos em duplicata para cada uma das temperaturas. Foi utilizada uma Máquina Universal de Ensaio Instron, com célula de carga de 25 toneladas, do Laboratório de Ensaio Mecânicos, do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (DEMET), da Escola de Minas (EM), da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). A taxa de deslocamento do pistão hidráulico utilizada nos ensaios foi 2mm/min.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos ensaios realizados, foram obtidas as curvas tensão x deformação de engenharia para cada temperatura avaliada. A Figura 4.1 apresenta um comparativo entre essas curvas, sem correção do modo de elasticidade. Já a Tabela 4.1 expõe os valores médios de limite de escoamento e de limite de resistência, bem como a redução da área da seção transversal e a deformação total sofrida pelos corpos de prova.

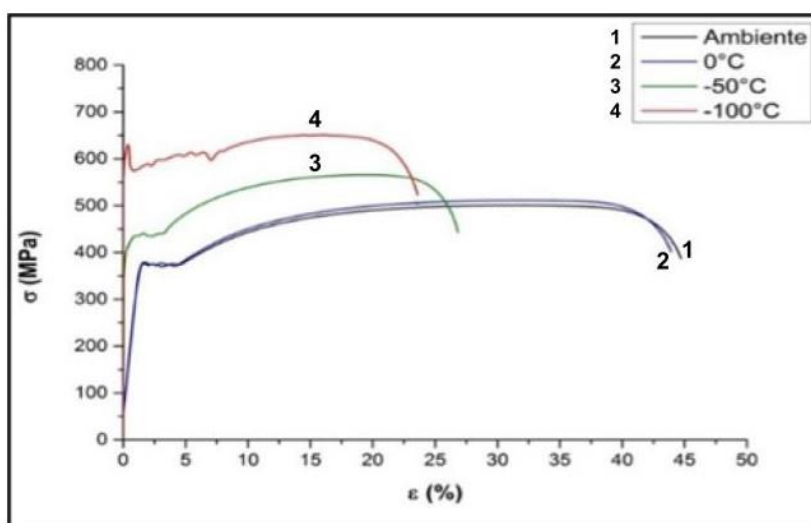


Figura 4.1 - Curvas tensão x deformação obtidas para o aço ASTM A36, em tração, nas temperaturas ambiente, 0°C, -50°C e -100°C, a partir do equipamento desenvolvido

Tabela 4.1 - Propriedades mecânicas do aço ASTM A36 submetidas a ensaios de tração nas temperaturas ambiente, 0°C, -50°C e -100°C, a partir do equipamento desenvolvido

| Temperatura | Limite de Escoamento (MPa) | Limite de Resistência (MPa) | Redução de Área (%) | Deformação Total (%) |
|-------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------|----------------------|
| Ambiente | 375 ± 3 | 504 ± 3 | 65 ± 3 | 35 ± 2 |
| 0°C | 378 ± 8 | 513 ± 2 | 65 ± 4 | 35 ± 2 |
| -50°C | 440 ± 5 | 570 ± 4 | 56 ± 3 | 14 ± 2 |
| -100°C | 570 ± 4 | 645 ± 6 | 56 ± 3 | 23,9 ± 0,4 |

Por meio de comparações entre as especificações das propriedades mecânicas sob tração do aço ASTM A36 (Tabela 3.3) e os dados obtidos no ensaio à temperatura ambiente (Tabela 4.1), percebe-se que os valores encontrados estão dentro do especificado, de modo a confirmar que o aço utilizado nos testes atende às especificações para um aço do tipo A36.

Tubex, Minnebruggen e Waele (2015) estudaram o comportamento em baixas temperaturas de aços baixo carbono. Uma amostra de um aço API 5L X80 foi submetida a ensaios de tração feitos às temperaturas de 0°C e -60°C, em que foi notado um aumento no valor do limite de escoamento de 510MPa para 530MPa. Ainda no mesmo estudo, os autores ensaiaram um aço API 5L X65 que, assim como o primeiro, apresentou o aumento do limite de escoamento e do limite de resistência. Os resultados sugerem que, para temperaturas mais baixas, há uma tendência dos indicadores de resistência mecânica aumentarem significativamente (TUBEX; MINNEBRUGGEN; WAELE, 2015). Esse comportamento também é observada no trabalho de Yan et al, 2014 com os aços S690 e HSS S460, em que ambos apresentaram aumentos consideráveis de limites de escoamento e limites de resistência com a diminuição da temperatura de +30°C para -70°C. No presente estudo, os resultados encontrados para limite de escoamento nas temperaturas 0°C e -50°C foram 378MPa e 440MPa, respectivamente (cf. Tabela 4.1), comprovando-se essa tendência. Conseqüentemente, houve também o aumento do limite de resistência, que elevou-se em 26% com a diminuição da temperatura de 0°C para -50°C.

Outra propriedade analisada por Tubex, Minnebruggen e Waele (2015) foi a deformação total. O estudo dos autores mostrou um aumento dos valores de alongamento a partir da diminuição da temperatura. Para o aço X80, esse aumento foi de 8% para 9%, enquanto que para o aço X65 o valor progrediu de 11% para 15%. Já no presente estudo, comparando-se o ensaio à temperatura ambiente com os ensaios em temperaturas subzero, diferentemente do analisado por Tubex, Minnebruggen e Waele (2015), observou-se que, quanto menor a temperatura de ensaio, menores foram os valores de alongamento total do material, com exceção da temperatura de -100°C. Como já comentado na seção de introdução, a baixa disponibilidade de dados na literatura sobre o comportamento desses aços em baixas temperaturas sugere a necessidade de novas pesquisas, a fim de refinar o conhecimento sobre a tendência de comportamento do alongamento total em tração de aços diferentes em condições de temperatura subzero.

Na Figura 4.1, é notória a presença de um patamar de escoamento descontínuo em todas as curvas. A existência desses patamares se explica em aços baixo carbono, como o estudado, pela interação de átomos intersticiais com discordâncias, gerando uma

instabilidade no início da deformação plástica (GIAROLA, 2012). Pelos resultados obtidos, percebe-se que, com a diminuição da temperatura, esse fenômeno continua presente; entretanto se nota que, quanto mais baixa é a temperatura de ensaio, mais extenso é o patamar. Essa mesma observação também foi feita por Tubex, Minnebruggen e Waele (2015) ao investigar o aço API X65.

Após a execução dos ensaios de tração, um corpo de prova para cada temperatura de ensaio foi selecionado e submetido a análises microfractográficas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Para esse fim, foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura TESCAN VEGA 3, do Nanolab da Rede Temática em Engenharia de Materiais, da Universidade Federal de Ouro Preto. A Figura 4.2 ilustra as imagens feitas no MEV, bem como a morfologia da região central de fratura do material em função das temperaturas de ensaio.

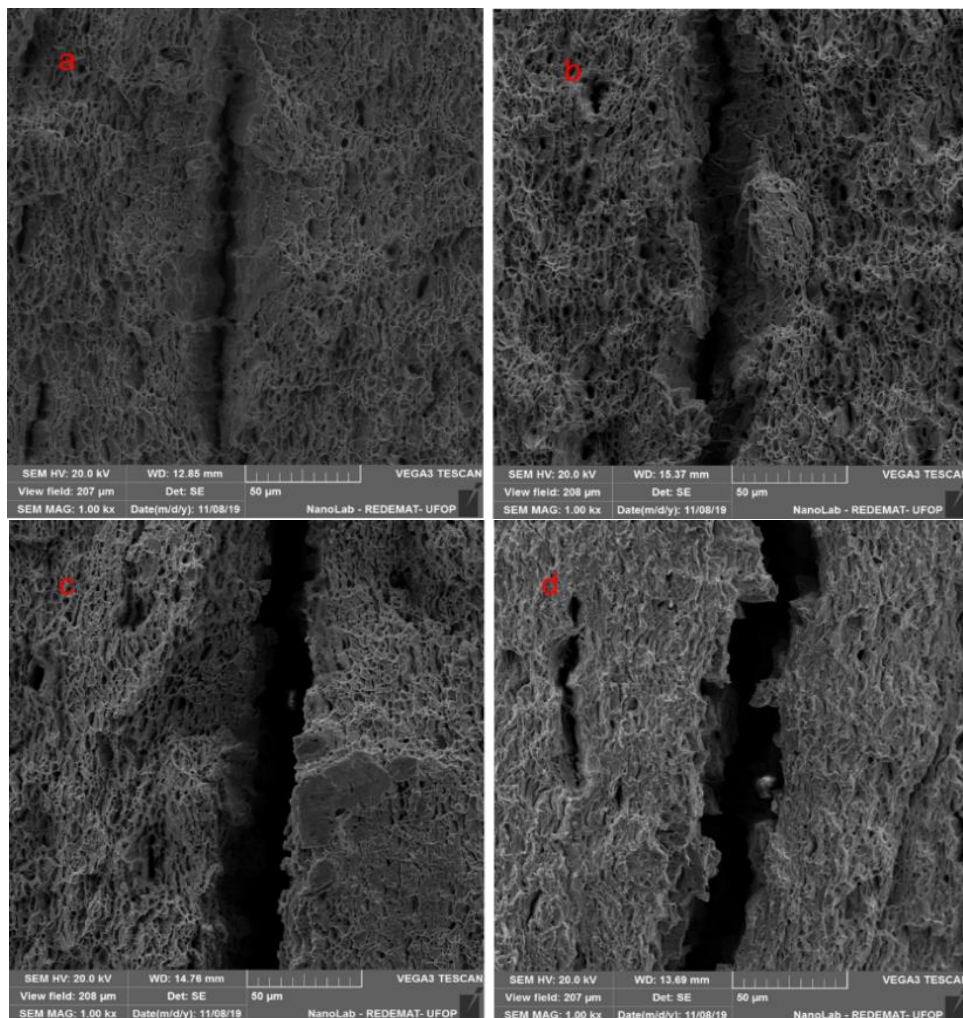


Figura 4.2 - Microfractografias das superfícies de fratura dos corpos de prova submetidos aos ensaios nas temperaturas: a) ambiente, b) de 0°C, c) de -50°C, d) de -100°C – MEV

A partir da análise das fraturas, mostradas na Figura 4.2, é possível observar a presença de *dimples* na amostra ensaiada na temperatura ambiente, caracterizando uma fratura dúctil. Na análise feita no CP ensaiado a 0°C, os *dimples* continuam presentes, no entanto se percebe delaminações mais profundas em relação às verificadas na temperatura ambiente. A -50°C os *dimples* ainda podem ser observados, porém com menor tamanho médio; percebem-se também áreas de facetas de clivagem, enquanto as delaminações se mostram cada vez mais grosseiras, indicando uma fratura semidúctil. Finalmente, a -100°C percebem-se *dimples* ainda menores intercalados por áreas com facetas de clivagem. As delaminações permanecem muito recorrentes e grosseiras, indicando também uma fratura semidúctil.

A análise dos resultados obtidos pelos ensaios com o aço ASTM A36, comparada aos dados da literatura, sobre o comportamento dos aços baixo carbono em condições de baixas temperaturas, permitiu concluir que o equipamento é capaz de simular ambientes de temperaturas subzero com boa precisão e confiança.

Com relação a montagem do aparato proposto nesse trabalho, a utilização de componentes de baixo custo representa um desafio para o desenvolvimento desse tipo de equipamento que necessita de robustez, pois caso ocorra uma falha durante o uso, há o comprometimento dos resultados finais. Porém, uma máquina capaz de obter os mesmos resultados custa centenas de vezes mais do que o equipamento proposto neste trabalho. Para contornar esse óbice, foram feitas escolhas baseadas em sistemas que já são reconhecidamente robustos, eficientes e facilmente encontrados no mercado, como, por exemplo: a) a válvula solenoide, que permite a comutação da passagem de gás utilizada em sistemas pneumáticos de caminhões; b) uma fonte chaveada ATX, provinda de um computador de mesa, utilizada como fonte de alimentação; c) a placa Arduino Nano, muito comum em prototipagens residenciais e estudos de física. Outro fator que conferiu ao dispositivo um bom desempenho é a programabilidade, visto que possíveis erros podem ser facilmente visualizados através de mensagens no ecrã do microcomputador, como, por exemplo: a) “termopar rompido”; b) “termopar em curto”; c) “sobrecarga no sistema de aquisição”, tornando os resultados mais confiáveis. Os sistemas programáveis são também reconfiguráveis, ou seja, eventuais atualizações podem ser realizadas com facilidade.

5 CONCLUSÕES

O dispositivo desenvolvido permitiu controle estável de temperaturas subzero até -170°C com desvio máximo de $\pm 1,4^{\circ}\text{C}$ na isoterma, o que permitiu a realização satisfatória de ensaios de tração nas temperaturas 0°C, -50°C e -100°C em um aço do tipo ASTM A36, com desvio máximo de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ na isoterma de ensaio.

O fato da câmara fria poder ser fabricada a partir de simples impressões em 3D e recortes de isopor ampliam de forma considerável a gama de equipamentos e ensaios que podem utilizar o mesmo aparato. Alterando-se apenas a geometria da câmara fria, o mesmo equipamento pode ter aplicações em diversas áreas do conhecimento, como, por exemplo: a) ensaios mecânicos relacionados à área de materiais; b) conservação de materiais químicos ou biológicos; c) estudos envolvendo materiais supercondutores; d) além de diversas outras investigações em temperaturas subzero.

Com isso, conclui-se que todas as premissas propostas para este trabalho foram atendidas com êxito, garantindo a confecção de um equipamento confiável e viável economicamente, que possa ampliar futuros estudos na Universidade Federal de Ouro Preto, bem como em diversas outras instituições de pesquisa que tenham interesse por adotar o método de fabricação proposto.

6 SUJESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Quanto aos ensaios de tração, os resultados mostram um comportamento interessante do material ensaiado, visto que o alongamento apresentou uma queda nos ensaios nas temperaturas 0°C e -50°C de 35% para 14%. Já nas temperaturas de -50°C para -100°C, houve uma inversão desse comportamento, em que o alongamento aumenta de 14% para 23,9%. Outra observação importante diz respeito as curvas tensão *versus* deformação, que indicaram patamares de escoamento descontínuo do aço ASTM A36 ensaiado nas diferentes condições. Esses dois comportamentos devem ser avaliados em um próximo estudo, a fim de se entender os fenômenos metalúrgicos que geraram tais resultados.

É interessante que se amplie a aplicação desse equipamento para a utilização em diferentes possibilidades de ensaios tais como tenacidade a fratura, ensaios de fadiga e ensaios de torção. Para isso, é recomendado que seja confeccionada uma câmara fria para cada tipo de teste pretendido e em seguida, que se realizem novos ensaios para a confirmação e validação das demais aplicações desse aparato.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6650: 2014** - Bobinas e chapas finas a quente de aço-carbono para uso estrutural - Especificação, ABNT, Rio de Janeiro, 2014.

AKSELSEN, O.M.; ØSTBY, E.; NYHUS, B. Low Temperature Fracture Toughness of X80 Girth Welds. In: **The Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference**, 2012, properties of normal strength mild steel and high. Rhodes, 2012.

ASTM - American Society for Testing Materials - **ASTM E8 / E8M-16a1**, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.

BITYUKOV, S.M.; LAEV, K.A.; MUSHINA, O.V.; LEFLER, M. N.; ZHUKOVA, S.Y.; KOCHESHKOVA, E.V. Improvement of low temperature behavior of 80 ksi grade pipe steel with of 13% Cr. **Chern.** 2010; 12: 58–62.

CZARKOWSKI, P.; KRAWCZYNSKA, A. T.; SLESINSKI, R.; BRYNK, T.; BUDNIAK, J.; LEWANDOWSKA, M. Low temperature mechanical properties of 316L type stainless steel after hydrostatic extrusion. **Fusion Engineering and Design.** 2011 October; 86: 2517-2521.

FASSINA, P.; BOLZONI, F.; FUMAGALLI, G.; LAZZARI, L.; VERGANI, L.; SCIUCCATI, A. Influence of hydrogen and low temperature on pipeline steels mechanical behavior. **Procedia Engineering.** 2011; 10: 3226-3234.

FASSINA, P.; BRUNELLA, F.; LAZZARI, L.; RE, G.; VERGANI, L.; SCIUCCATI, A. Fatigue behavior of pipeline steel under hydrogen environment and low temperature. **Procedia Engineering.** 2011; 10: 3345-3352.

GIAROLA, A.M. **Análise do Comportamento de Chapas de Pequena Espessura Submetidas ao Passe de Encruamento por Laminação e Posterior Ensaio de Tração Através da Simulação pelo Método de Elementos.** 2012. 73 p. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Belo Horizonte (MG): 2012.

HEIER, E.; ØSTBY, E.; AKSELSEN, O. M. Reeling Installation of Rigid Steel Pipelines at Low Conference, 2013, Anchorage Temperature. In: **The Twenty-third International**

Offshore and Polar Engineering. International Society of Offshore and Polar Engineers. 2013.

LUZ, G. **Aço ASTM A36 Propriedades Mecânicas e Composição Química.** *Blog Materiais*, 2017. Disponível em: <https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/astm-a36-propriedades-mecanicas-e-composicao-quimica.html>. Acesso em: 09 de maio de 2020.

MAXIM INTEGRATED. **Site da Maxim Integrated.** Disponível em: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX31855.pdf>. Acesso em: 26 de março de 2020.

PARIS, A.F.; MULAZZANI, F.; PARIS, J-M. Estudo Microestrutural de Aço Carbono Soldado com o Processo Arco Submerso e Adições de Fe-Ti. **Soldag Insp.** São Paulo, vol. 17, n. 1, p. 58-64, jan./mar., 2012. Disponível em http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-92242012000100009&lng=pt&nrm=iso. Acesso em: 11 de maio de 2020.

POLETSKOV, P.; GUSHCHINA, M.; POLYAKOVA, M.; ALEKSEEV, D.; NIKITENTO, O.; CHUKIN, D.; VASIL'EV, Y. Development of alloyed pipe steel composition for oil and gas production in the arctic region. **Resources.** 2019 abril 8; 1-11.

SHIRYAEV, A. G.; CHETVERIKOV, S. G.; CHIKALOV, S. G.; PYSHMINTSEV, I.Y.; KRYLOV, P.V. Production of seamless steel pipe for oil and gas extraction in challenging conditions. **Steel in Translation.** 2018 March 4; 48: 704-711.

SOUZA, A. R.; PAIXÃO, A. C.; UZÊDA, D. D.; DIAS, M. A.; DUARTE, S.; AMORIM, H. S. A placa Arduino: uma opção de baixo custo para experiências de física assistidas pelo PC. **Rev. Bras. Ensino Fís.**, São Paulo, v. 33, n. 1, p. 01-05, mar, 2011. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172011000100026&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 12 de maio de 2020. <https://doi.org/10.1590/S1806-11172011000100026>.

TOMOTA, Y.; XIA, Y.; INOUE, K. Mechanism of low temperature brittle fracture in high nitrogen bearing austenitic steels. **Acta Materialia.** 1998; 46: 1577-1587.

TUBEX, H.; MINNEBRUGGEN, K.V.; WAELE, W. D. Low temperature tensile properties of line pipe steels. **International Journal Sustainable Construction & Design.** 2015 October; 6(3).

YAN, J. B.; LIEW, J.Y. R.; ZHANG, M. H.; WANG, J. Y. Mechanical properties of normal strength mild steel and high strength steel S690 in low temperature relevant to Artic environment. **Materials and Design**. 2014 May 1; 61: 150-159.