

### 3 Materiais e Métodos

Serão apresentados neste capítulo os materiais e os métodos que foram utilizados no desenvolvimento deste trabalho. Durante a experiência foram utilizados cinco eletrodos oxi-rútílicos (A, B, C, D e E) contendo em seus revestimentos adições de níquel e molibdênio. Com estes eletrodos foram soldadas três juntas de topo com chanfro V e, destas juntas, os corpos-de-prova foram retirados para macro e micrografia, ensaio de tração, ensaio charpy V e ensaio de microdureza.

#### 3.1. Material

As chapas usadas foram de aço ASTM A-36 com dimensões de 280 x 300 mm e espessura de 16 mm preparadas com chanfro V de 60° (Figura 26).

Os eletrodos oxi-rútílicos foram produzidos pela ESAB. Sua alma é de um aço baixo carbono, com diâmetro de 3.25 mm e comprimento de 35 mm. O metal de solda possui teor estimado de 2% de níquel para as cinco amostras e o teor de molibdênio variando de 0 a 0.4% (valores baseados em soldas atmosféricas).

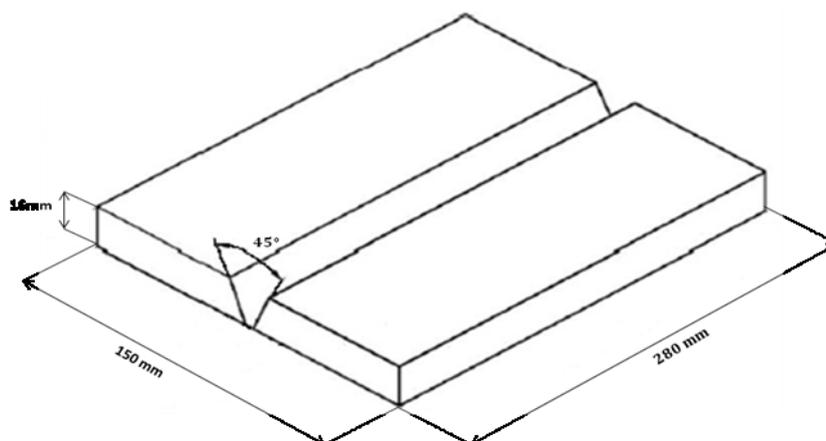


Figura 26: Chapa de aço ASTM A-36

## 3.2. Metodologia

### 3.2.1. Métodos de Soldagem

A soldagem foi realizada no laboratório de soldagem da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Para a realização deste processo foi utilizada uma fonte de soldagem eletrônica – LINCOLN ELETRIC, modelo POWER WAVE 450. Para simular a profundidade de 10 m foi utilizado um simulador de soldagem hiperbárica, como mostra a Figura 27, que permite trabalhar com pressões de até 20 atm.

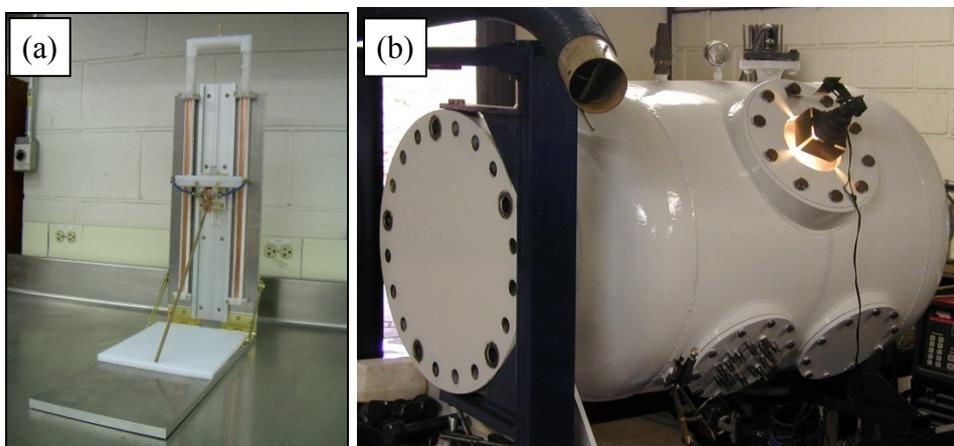


Figura 27: (a) Sistema de soldagem por gravidade. (b) Simulador de soldagem hiperbárica empregado nos testes de soldagem a 10m e 20m de profundidade equivalente

As soldas foram realizadas em água doce, por arraste, na posição plana, em polaridade direta, com inclinação do eletrodo de  $60^\circ$  e corrente na faixa de 150 a 170 A. Os números de passes depositados para a elaboração da solda foram de 12 a 14 passes. O dispositivo de soldagem por gravidade inserido dentro do simulador hiperbárico foi utilizado para realização das soldas.

### 3.2.2. Preparação dos Corpos de Prova

Para a preparação de todos os corpos de prova, as cinco placas soldadas foram submetidas aos seguintes processos:

- Usinagem
- Ensaio metalográfico

Usinagem: As três placas foram usinadas no laboratório do Instituto de Tecnologia PUC-Rio (ITUC). Neste processo, os cordões de solda foram cortados em cinco tipos de corpos de prova com as seguintes especificidades:

- Três amostras para macro e micrografia (para cada teor),
- Três amostras para o ensaio charpy V (para cada teor),
- Uma amostra para o ensaio de tração (para cada teor).

O somatório destas peças ficou em nove amostras para a caracterização micro e macrográfica, nove amostras para o ensaio charpy V e três amostras para o ensaio de tração.

Para as amostras com zero e 0.4% de Mo (já usinadas) havia três corpos de prova com as seguintes especificidades:

- Duas amostras para macro e micrografia (uma de cada teor),
- Três amostras para o ensaio charpy V (uma para cada teor)
- Uma amostra (0%Mo) para o ensaio de tração.

Somando, ao todo, trinta e três amostras utilizadas neste trabalho. A razão pela qual não foram utilizadas quantidades superiores de amostras para o ensaio de tração se dá pela dificuldade de obtenção destas amostras (o processo de soldagem subaquática molhada é bastante complexo devido suas dificuldades de operação e produção dos cordões de solda) e também pelo objetivo do trabalho que é de seguir os procedimentos da norma D3.6M:1999 da AWS.

Ensaio metalográfico: Após a usinagem foi feito o lixamento nos corpos de prova que foram submetidos à caracterização macro e microestrutural. As peças foram polidas utilizando uma politriz Panambra DP10, o lixamento foi realizado nas granulometrias 220, 320, 400, 600 e 1200. Para o polimento foi utilizada pasta de diamante de 6  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$  e 1  $\mu\text{m}$ . Polidas, as amostras foram atacadas com a solução de Nital 2% por aproximadamente 10 segundos.

### **3.2.3. Caracterização Microestrutural**

O microscópio utilizado para a caracterização microestrutural foi da marca Zeiss, modelo AxionPlan 2, cujas imagens foram processadas pelo software AxioVision (Figura 28). O aumento utilizado para a captura das imagens foi de 50 e 500X. A metodologia aplicada para a caracterização microestrutural foi baseada na elaboração de mosaicos. Mosaicos são estruturas compostas por vários campos

de imagens concatenadas nas direções x e y através do deslocamento motorizado da amostra, formando uma única imagem que cobre grandes regiões das amostras nas quais as estruturas relevantes são maiores do que o campo a uma dada magnificação [33]. Os mosaicos atingem a região correspondente ao reforço da solda para permitir uma melhor correlação entre as características macro e microestruturais e as propriedades mecânicas, as quais são medidas na região central do metal de solda.



Figura 28: Microscópio AxioPlan 2 – DEMa, Laboratório de Processamento Digital de Imagens (LPDI), PUC-Rio

Primeiro foi feito um mosaico 8x8 (aumento de 50X) de toda a face polida da amostra, com a finalidade de servir de base de marcação espacial para a elaboração dos próximos mosaicos. Os mosaicos nomeados por 1, 2 e 3 são compostos de aproximadamente cinquenta e três imagens (cerca de 10 mm de comprimento), sendo estas imagens posicionadas uma embaixo da outra, formando uma única coluna (Figura 29).

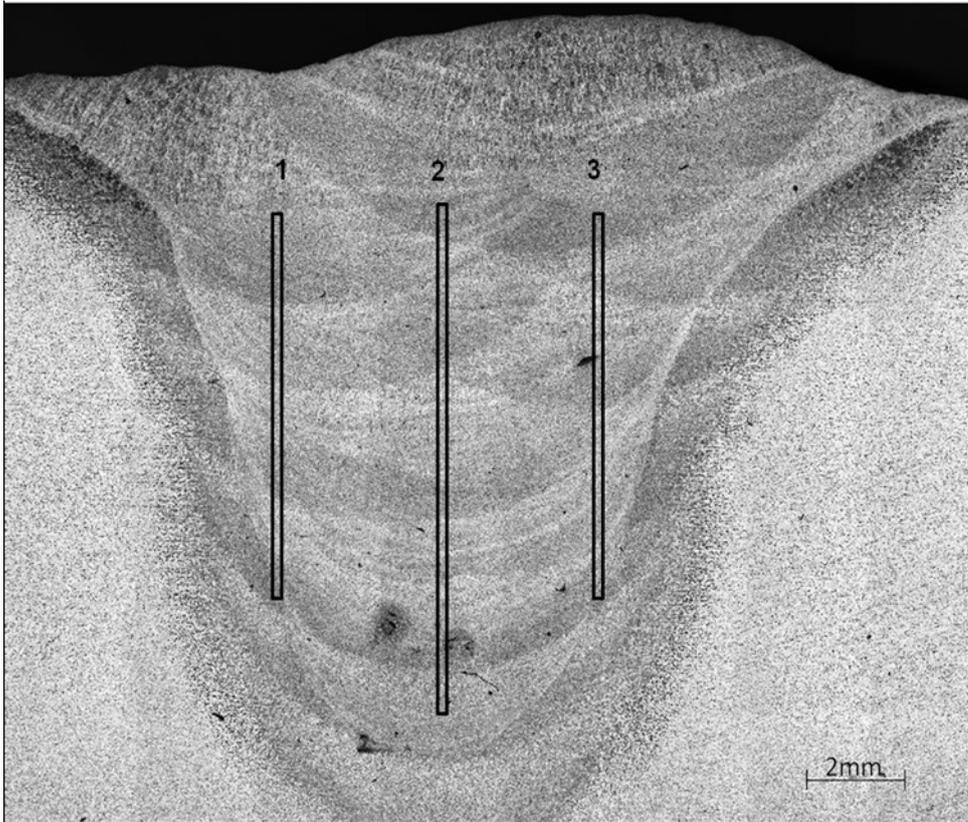


Figura 29: Mosaico (8x8) da amostra. Aumento de 50x

Foram feitas as caracterizações microestruturais, de regiões colunares e reauecida de grãos grosseiros e finos além da medição do tamanho médio de grãos. Para as amostras com zero e 0.4%Mo foram utilizados os mosaicos 1, 2 e 3, e para as amostras com 0.1, 0.2 e 0.3%Mo foi somente utilizado o mosaico 2. Os processos de análise estão descritos nas próximas seções.

### 3.2.3.1. Caracterização dos Micro-Constituintes

Este método consiste na avaliação e contagem dos tipos de micro-constituintes existentes no metal de solda. Foram analisados sete constituintes distintos que são: ferrita pró-eutetóide (FPE), ferrita com segunda fase alinhada (FSA), ferrita com segunda fase não-alinhada (FSF-NA), ferrita acicular (FA), ferrita poligonal (FP), ferrita acicular da região reauecida (FA-RA) e agregados ferrita-carbeto (AFC). Para realizar a contagem das fases foi sobreposta uma grade, contendo cem pontos, em cada imagem. Em cada ponto foi verificado o tipo de microestrutura e anotado para que posteriormente pudesse ser realizado o cálculo estatístico. (Figura 30).

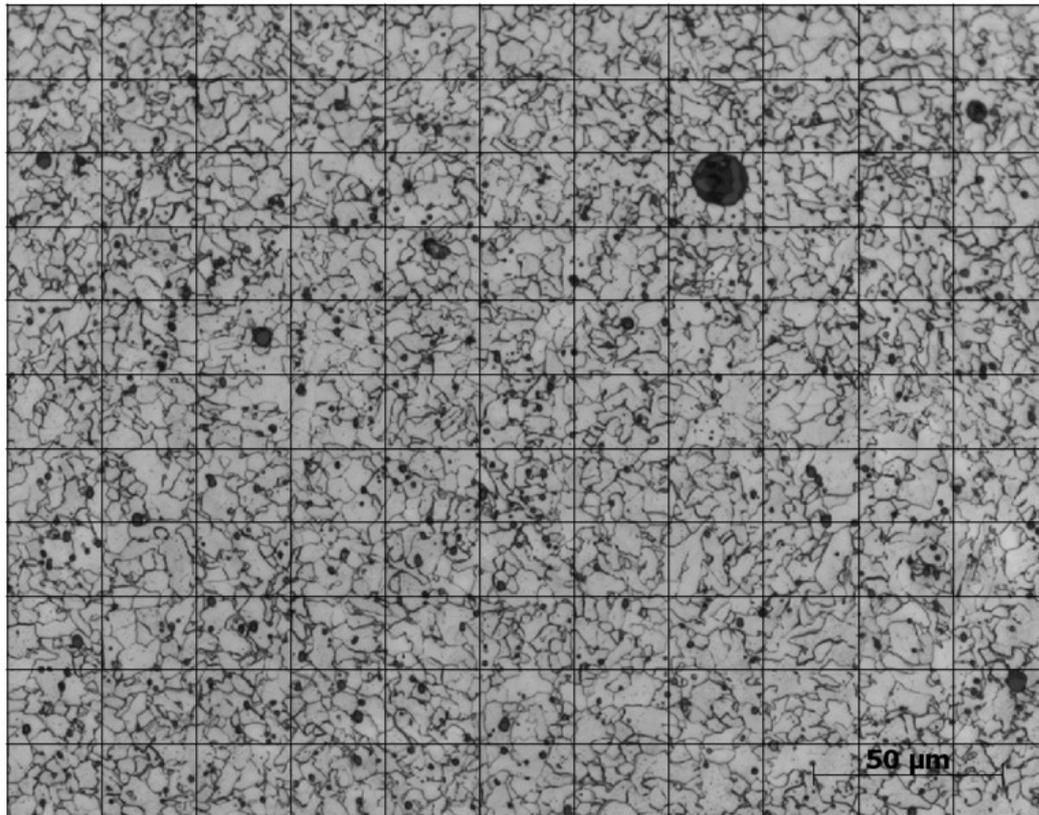


Figura 30: Imagem do mosaico do metal de solda com a grade de contagem. Aumento 500x

### 3.2.3.2. Caracterização de Regiões

Este método consiste em analisar visualmente as regiões e quantificá-las. As regiões a serem caracterizadas são: região colunar (RC) e região reauecida, sendo que a última é dividida em duas sub-regiões: região de grãos finos (RGF) e região de grãos grosseiros (RGG). A classificação destas regiões foi feita visualmente a cada mosaico. Os mosaicos foram divididos em vinte partes de comprimento de 500  $\mu\text{m}$  (aproximadamente o tamanho do mosaico) e cada uma destas partes foi subdividida em cinco faixas de 100  $\mu\text{m}$  onde foram identificadas as regiões mostradas na Figura 31.

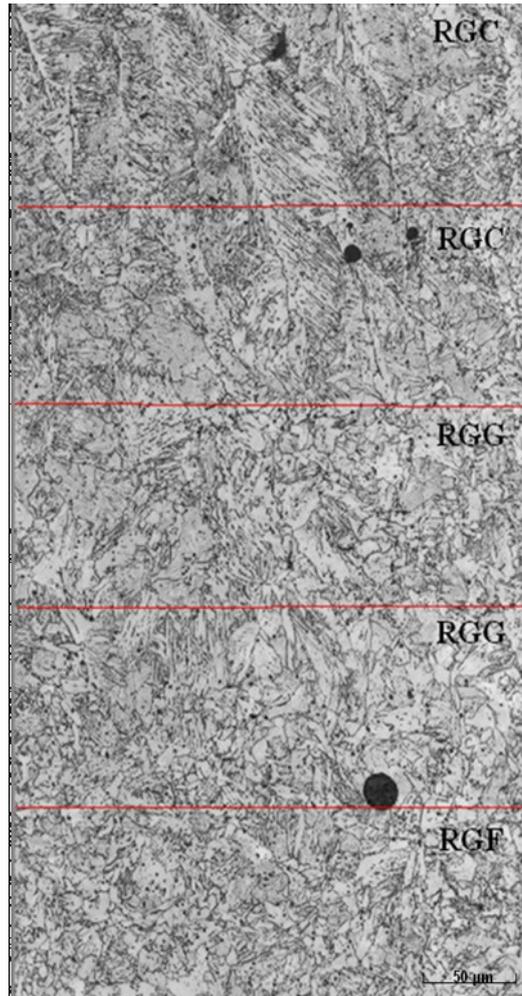


Figura 31: Imagem da parte do mosaico com 500  $\mu\text{m}$  de comprimento e suas faixas (100  $\mu\text{m}$ ) de análise

### 3.2.3.3. Medição do Tamanho Médio de Grão

Nesta etapa foi medido o tamanho de grão médio usando a seguinte metodologia: dos mosaicos utilizados, foram selecionadas algumas imagens que continham as regiões de grãos bem finos. Sobre estas imagens foram feitas linhas, de aproximadamente 100  $\mu\text{m}$  de comprimento, nas posições horizontal e vertical. Foram usadas 35 linhas distribuídas para conjuntos de sete imagens de cada amostra que continham região de grãos finos. Feito isso, a média do tamanho de grão foi calculada da seguinte forma: todos os grãos interceptados pela linha (Figura 32) foram contados e assim o comprimento da linha foi dividido pelo número de interceptos dos contornos de grão, o resultado é o valor médio do grão.

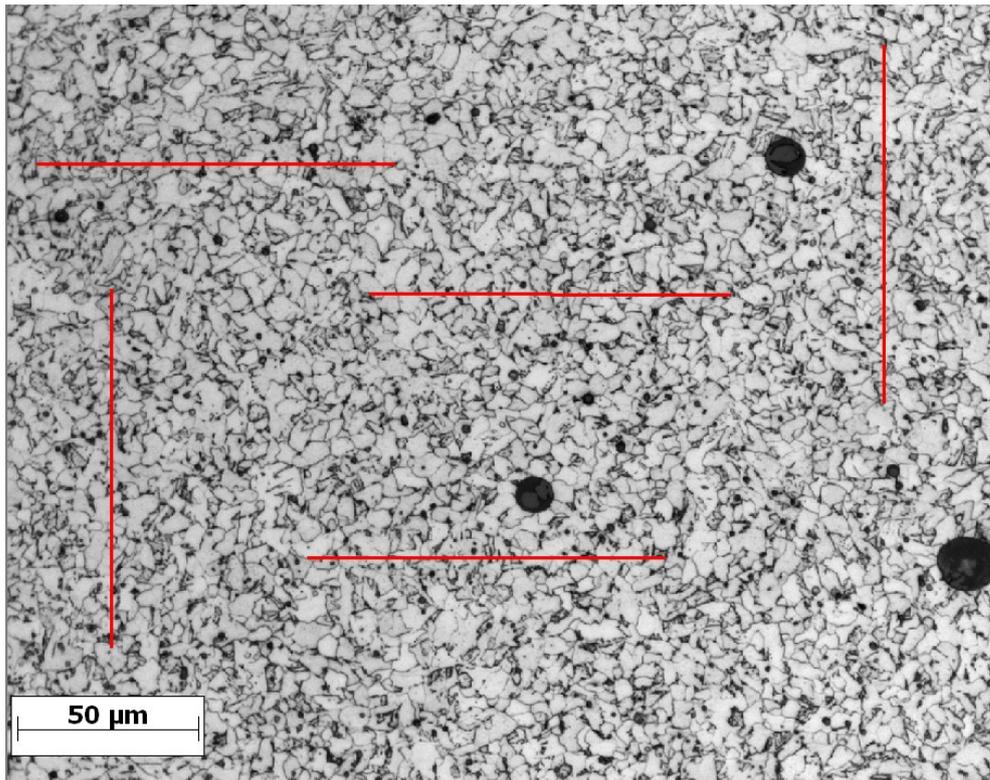


Figura 32: Esquema utilizado para a medição do tamanho de grão na região de grãos finos

### 3.2.4. Microscopia Eletrônica de Varredura e Microanálise (MEV)

O microscópio eletrônico utilizado foi da marca JEOL, modelo JSM-6510L, operando com tensão de 20 KV e corrente de 75  $\mu$ A. A caracterização dos agregados ferrita-carbeto presentes no metal de solda foram realizadas por EDS (Energy Dispersive X-Ray Detector) e a análise da superfície de fratura dos corpos de prova foram realizadas por SE (Secondary Electron).

### 3.2.5. Ensaios Mecânicos

#### 3.2.5.1. Ensaio de Microdureza

Este ensaio foi realizado no laboratório de Metalografia do Instituto de Tecnologia PUC-Rio (ITUC), em um microdurômetro da marca SHIMADZU HVM-2 Séries, com carga de 1 kg e tempo de indentação de 20 segundos. Foram realizadas dez identações, do topo até a raiz da solda, na região onde está localizado o mosaico 2.

### 3.2.5.2. Ensaio de Dureza

O ensaio de dureza foi realizado no Laboratório de Ensaios Mecânicos do ITUC, em uma máquina da marca AMSLER WOLPERT, modelo D-6700 com a carga de 5 kg e tempo de indentação de 20 segundos. A posição escolhida para o ensaio foi na região do mosaico 2, onde foram realizadas cinco identações na posição vertical.

### 3.2.5.3. Ensaio de Tração

O ensaio de tração do metal de solda foi realizado no laboratório do ITUC, em uma máquina universal de ensaios da marca INSTRON, modelo 5500 R e seus resultados foram processados pelo software Blue Hill (Figura 33). Este ensaio foi conduzido de acordo com a norma D3.6M:1999 da AWS [1].



Figura 33: Máquina de ensaio de tração, Instron, modelo 5500R. ITUC, PUC-Rio

Conforme a norma da AWS D3.6M:1999 [1], antes de ser realizado o ensaio de tração, o corpo de prova foi submetido a um tratamento térmico de 8 horas em um forno com a temperatura constante de 120°C, com a finalidade de eliminar uma parte do hidrogênio residual do metal de solda que ainda não tinha sido eliminado espontaneamente.

### 3.2.5.4. Ensaio Charpy V

O ensaio foi realizado no laboratório do Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio, a 0°C, conforme a norma da AWS D3.6M:1999 [1].

### 3.2.5.5. Macroidentação Instrumentada

A Macroidentação Instrumentada é uma técnica alternativa de avaliação de algumas propriedades mecânicas do metal de solda, tais como, limite de escoamento e limite de resistência à tração, onde estes resultados são obtidos através de ensaios de dureza.

Estes ensaios foram realizados pelo CENPES/PDP/TMEC – Tecnologia de Equipamentos, Materiais e Corrosão e são baseados na indentação controlada de uma superfície com múltiplos ciclos de carregamento e descarregamento em um mesmo ponto de ensaio. Os ensaios foram realizados com o aparato de ensaio da Figura 34-a.

As indentações foram realizadas diretamente na seção transversal das juntas soldadas dos corpos de prova que já se encontravam com superfície polida e atacada quimicamente. O posicionamento das indentações foi feito conforme a Figura 34-b. O penetrador utilizado foi uma esfera de WC-Co de 0,76 mm de diâmetro.

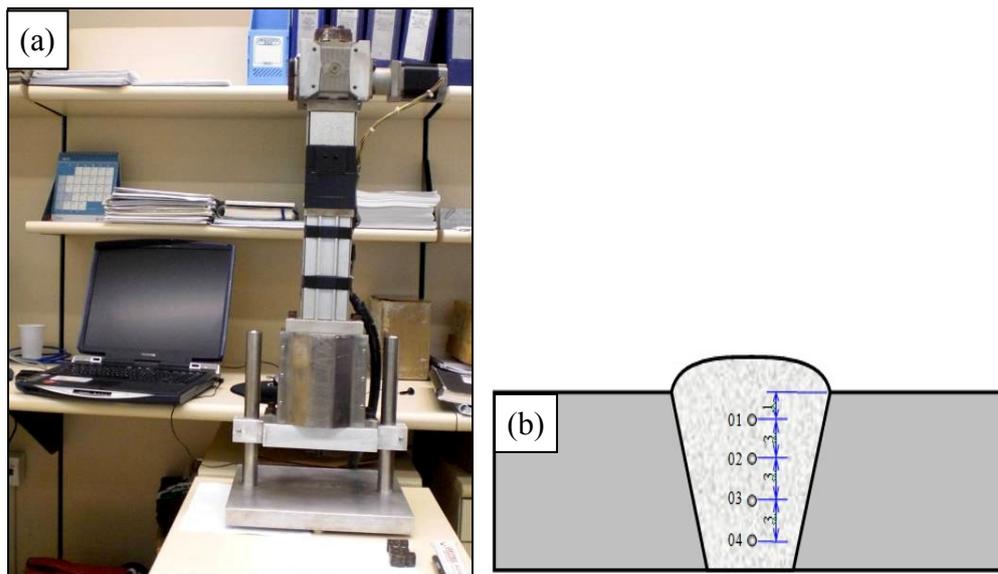


Figura 34: (a) Equipamento utilizado no ensaio de Macroidentação Instrumentada e (b) regiões de indentações

### **3.2.6. Análise Química**

As análises químicas das cinco amostras foram realizadas na FUNSHEL (Fundição Artística Industrial LTDA) pela técnica de espectrometria de emissão ótica. Os eletrodos foram identificados como A, B, C, D e E seguindo a variação percentual crescente do teor de Mo encontrada no metal de solda.