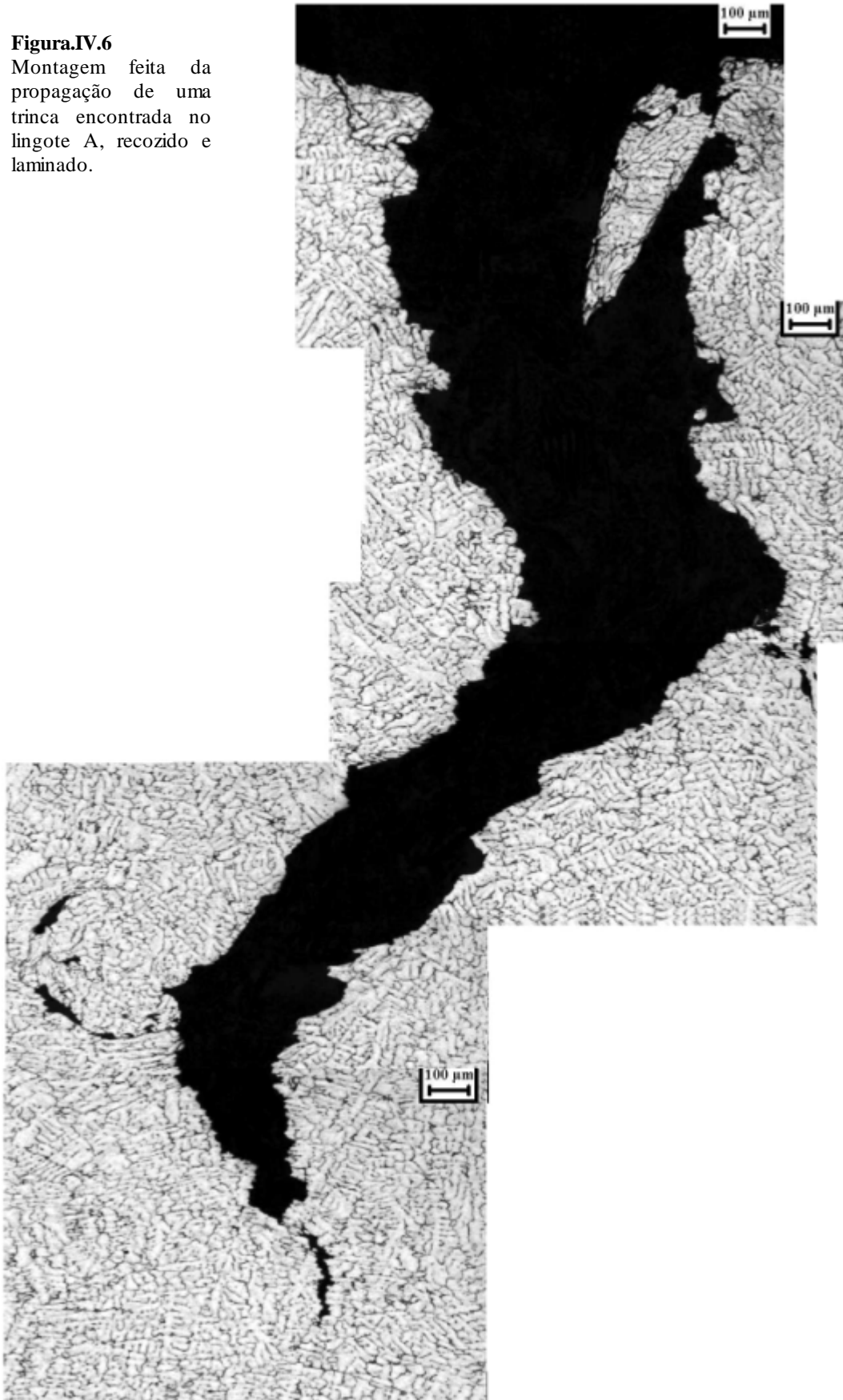


Figura.IV.6
Montagem feita da propagação de uma trinca encontrada no lingote A, recozido e laminado.



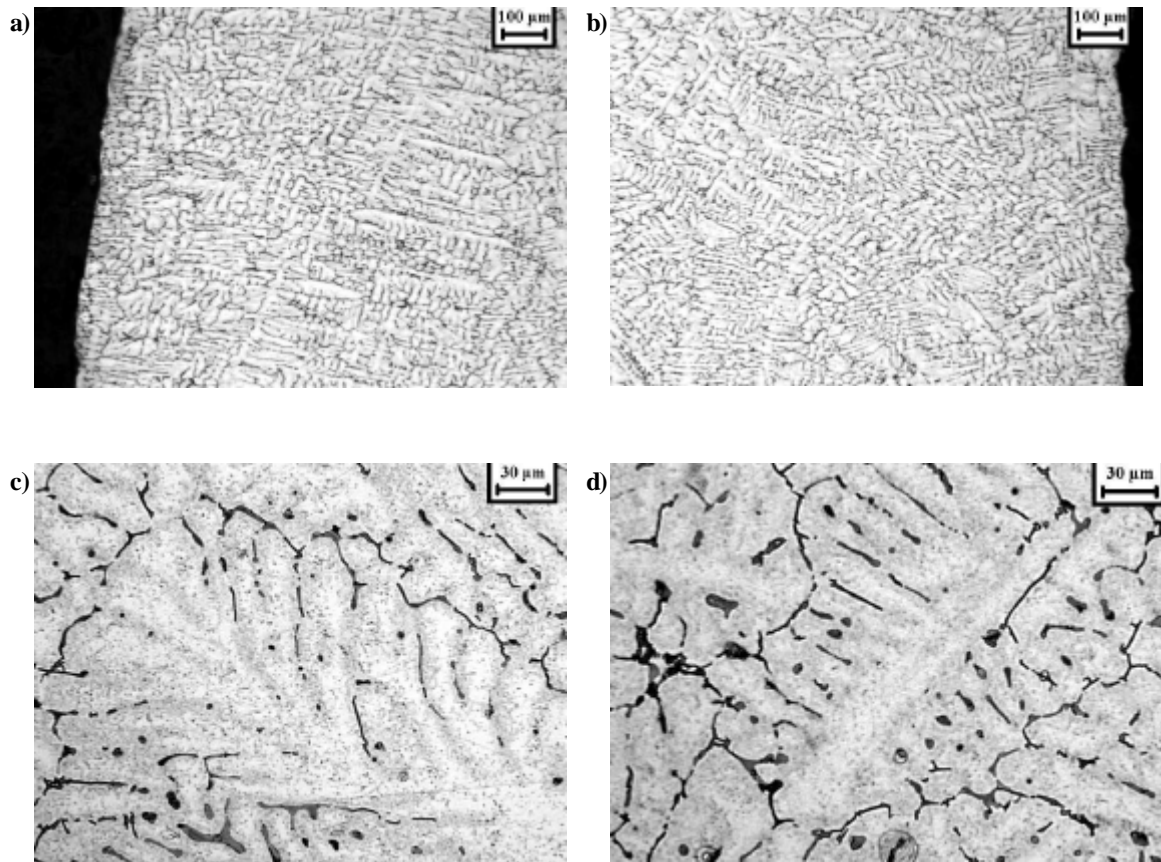


Figura.IV.6 – microestrutura do lingote A

- a) Formação estrutural próxima a superfície esquerda.
- b) Formação estrutural próxima a superfície direita.
- c) e d) Formação de dendritas α ; parte mais escura fase θ .

- *Análise de dureza* – O lingote CH1 após a laminação obteve dureza média de 59HB. E o lingote A obteve dureza de 70,6 HB.

V. Discussão dos resultados

V.1. Classificação das ligas

De posse da análise química real dos lingotes N°1, N°3, B, C, F e H, dos corpos de prova A01 e dos blocos forjados B01 e B02, comparou-se estes resultados com as composições químicas nominais da norma *Aluminum Association*, usando as referências [25,26] deste trabalho.

Para os lingotes B, C, F e H, não foi encontrada uma especificação da AA que pudesse ser relacionada com a sua composição química real. A explicação deste fato é devida à origem dos lingotes, que são provenientes de sucatas de alumínio do LabMat. A sua especificação será simplesmente AAxxxx.

Já para os corpos de prova A01, como já era de se esperar, a composição química real (Tabela.IV.2) satisfaz as condições da composição química nominal da liga AA7175 (Tabela.II.1). Sendo assim, classifica-se os corpos de prova A01 como liga AA7175

Para os lingotes N°1 e N°3, que são ligas fundidas, possuem composição química compatível com a composição química nominal da liga AA413.1, conforme mostra a comparação das Tabelas .IV.3 e .II.8. Assim, classifica-se os lingotes N°1 e N°3 como liga A413.1.

E por último, para os blocos forjados B01 e B02, foi confirmada sua especificação de origem como sendo liga AA7475, comparando a Tabela.IV.3 com a Tabela.II.5.

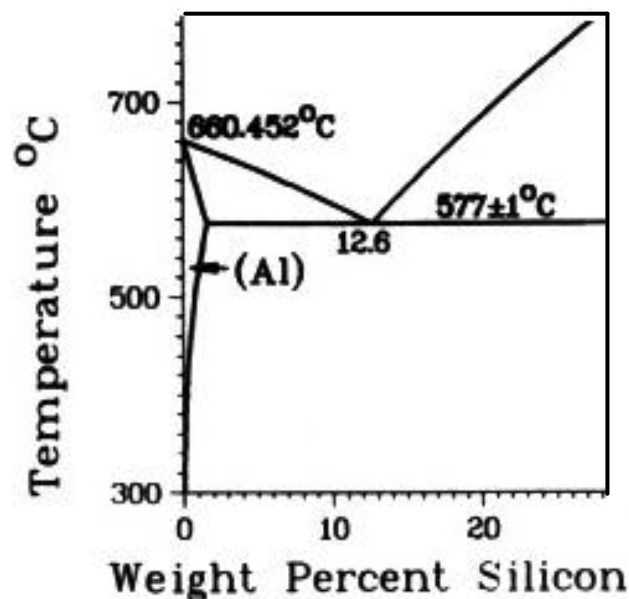
V.2. Temperatura de fusão das ligas fundidas.

Como foi visto no item III.2.3.1, a temperatura de fusão das ligas fundidas podem ser encontradas no diagrama de equilíbrio de fases. Logo, tendo a porcentagem em massa de Si em cada uma das ligas (vide Tabela.V.1) obtidos na análise química, encontra-se a temperatura de fusão das mesmas no diagrama de equilíbrio de fases Al-Si (vide Gráfico.V.1).

Tabela.V.1 – Porcentagem em massa de Si dos lingotes N°1 e N°3

| Nome do Lingote | % em massa de Si |
|-----------------|------------------|
| N°1 | 11.5 |
| N°3 | 12.2 |

Gráfico.V.1 – Diagrama de equilíbrio de fases Al-Si [19]

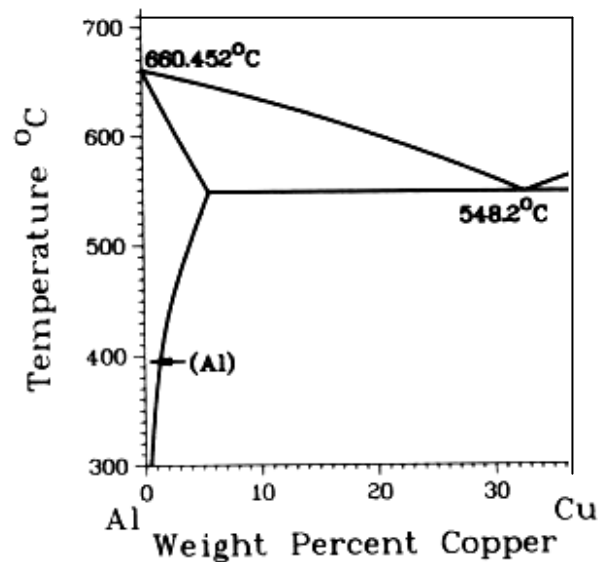


Assim, pelo diagrama, o ponto de fusão do lingote N°1 é aproximadamente 585°C, e o ponto de fusão do lingote N°3 é aproximadamente 580°C.

V.3. Temperatura de fusão das ligas trabalhadas

Como já era esperado, os lingotes B, C, F e H possuem baixo teor de elementos de liga, fazendo com que os mesmos tivessem baixa influência no ponto de fusão das ligas em questão. Assim, baseados no diagrama de equilíbrio de fases Al-Cu por exemplo (vide Gráfico.V.2), chegamos a um valor aproximado de temperatura de fusão.

Gráfico.V.2 - - Diagrama de equilíbrio de fases Al-Cu



Pelo diagrama a temperatura de fusão dos lingotes B, C, F e H é aproximadamente 660 °C.

V.4.Obtenção das ligas Al-Cu

O baixo teor de Cu encontrado no lingote CH1 é devido ao método aplicado durante sua fundição. Por este método, o Cu não se dissolveu como o esperado. Isto pode ser devido ao fato da limalha de Cu ter sido colocada sem a remoção da escória que seria retirada somente antes do vazamento, e pelo fato da substância ter sido misturado somente uma vez durante o processo de fundição.

Já o método aplicado na fundição do lingote A foi bem mais satisfatório quanto a presença de Cu no produto final. Para esta houve um desvio de 7,5% do esperado. O Cu foi colocado em duas cargas e foram realizadas quatro agitações; em cada um desses processos foi realizada a retirada de escoria do material, permitindo dissolução eficiente do Cu na liga fundida.

Uma amostra de uma liga de Al com 4% de Cu pode ser comparada na figura.V.1.Nota-se que a microestrutura aqui mostrada não condiz à encontrada (figuraIV.4 a Figura.IV.7).Um dos motivos é a existência de maior teor de silício do que o esperado nos lingotes CH1 e A, que se deve ao cadinho utilizado ter sílica em sua composição (vide na tabela.V.2 a diferença entre valores da composição química real e a projetada dos lingotes CH1 e A). Assim, o Si migrou do cadinho para o material fundido, aumentando o teor de Si na liga fundida, tornando-a mais frágil. Conseqüentemente, houve a impossibilidade de laminação da mesma como mostrado na figura.IV.2 e IV.4. A figura.V.2 mostra a presença da fase Si no lingote CH1.

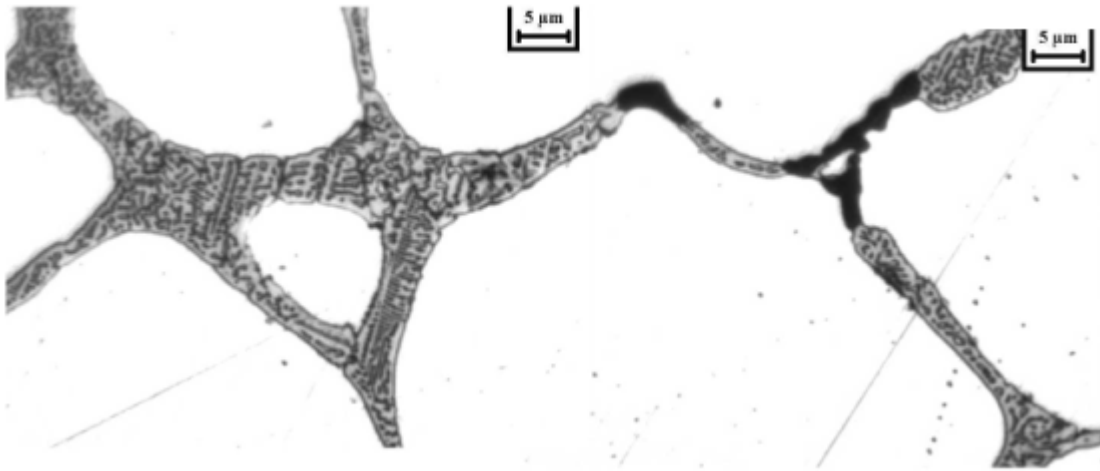


Figura.V.1 – Formação de fase θ em uma liga de Al - 4%Cu. Cortesia LabMat – FEI.

Tabela.V.2- Diferença entre os valores de composição química real e projetado dos lingotes fundidos

| | % em massa dos elementos | | | | | | | | | | | |
|------------------------|--------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|
| | Al | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Ni | Zn | Pb | Sn | Outros |
| CH1 - Projetado | 93.95 | 0.25 | 0.26 | 4.00 | 0.12 | 0.12 | 0.02 | 0.17 | 0.75 | 0.00 | 0.07 | 0.38 |
| CH1 | 95.21 | 1.47 | 0.34 | 1.25 | 0.12 | 0.11 | 0.02 | 0.16 | 0.97 | 0.23 | 0.00 | 0.13 |
| A - Projetado | 93.78 | 0.24 | 0.26 | 4.00 | 0.12 | 0.13 | 0.02 | 0.17 | 0.84 | 0.00 | 0.07 | 0.43 |
| A | 92.50 | 1.36 | 0.28 | 3.71 | 0.12 | 0.10 | 0.02 | 0.14 | 0.88 | 0.20 | 0.00 | 0.69 |

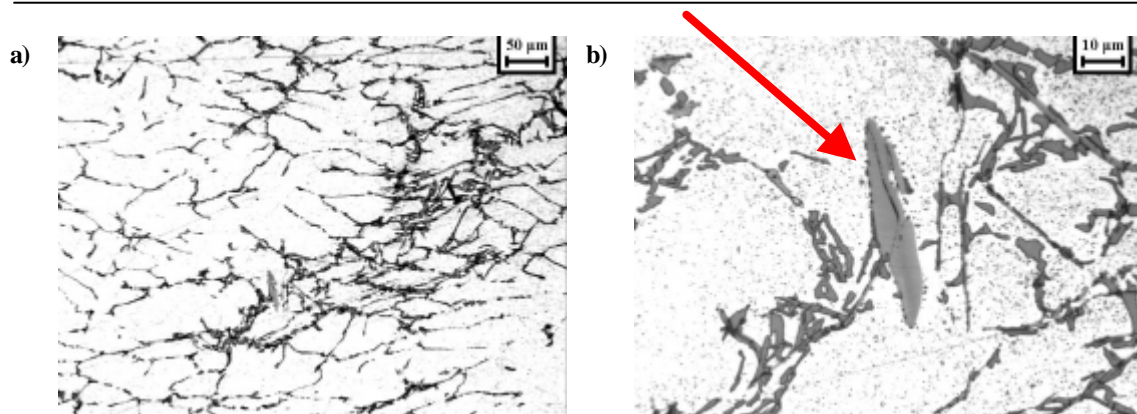


Figura.V.2 – a) Foto mostrando a presença e formação da fase Si
 b) Detalhe da foto(a), fase rica em Si indicada pela seta.

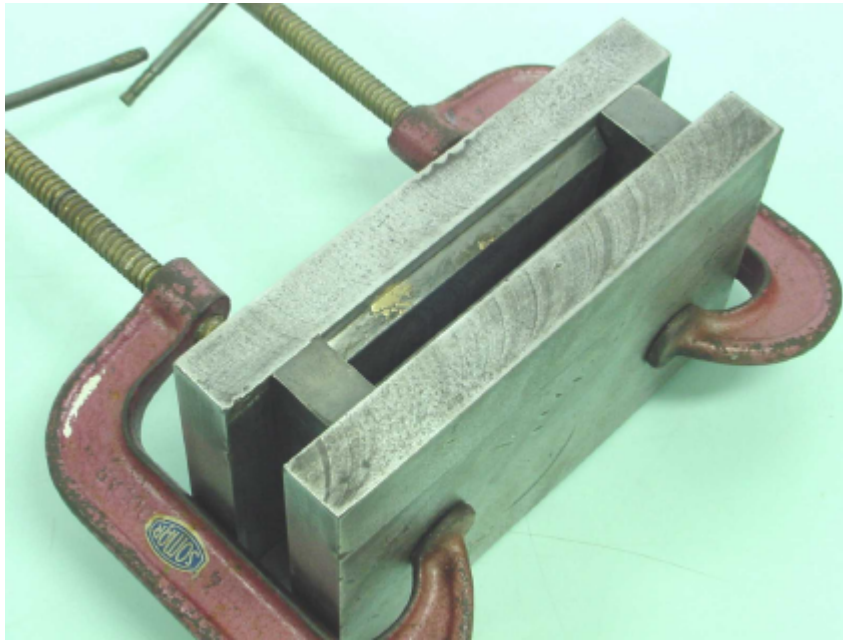
VI. Conclusões

- Após feita a análise química real das ligas, e achada a composição química nominal compatível, pode-se concluir que é possível classificar as ligas segundo as normas da *Aluminum Association*.
- É possível refundir as ligas de alumínio utilizadas no LabMat uma vez que sua temperatura de fusão gira em torno de 585°C e 660°C, e os fornos do LabMat possuem capacidade de 1000 à 1800°C.
- Não é aconselhável o uso do cadinho CCAF3 por causa da introdução de Si do mesmo para a liga fundida. É aconselhável, por exemplo, o uso de cadinhos de grafita para a fundição de alumínio.
- O método utilizado para fundição do lingote A é o mais apropriado para a obtenção de ligas Al-Cu.
- O planejamento realizado através da planilha eletrônica é coerente, tomando sempre os devidos cuidados para que se evite qualquer tipo de contaminação no método aplicado.

Apêndice A

Fotos da Lingoteira:

(a)



(b)

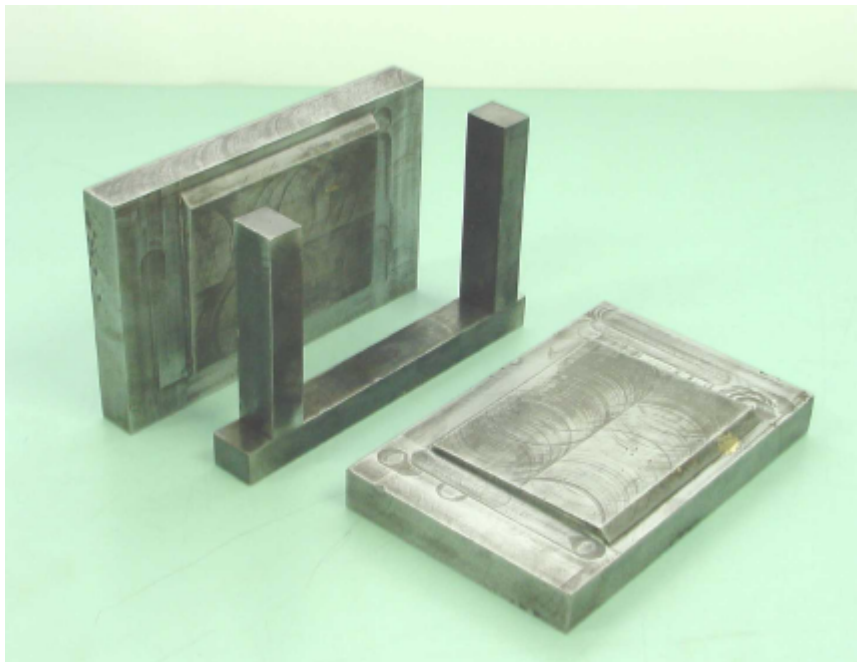
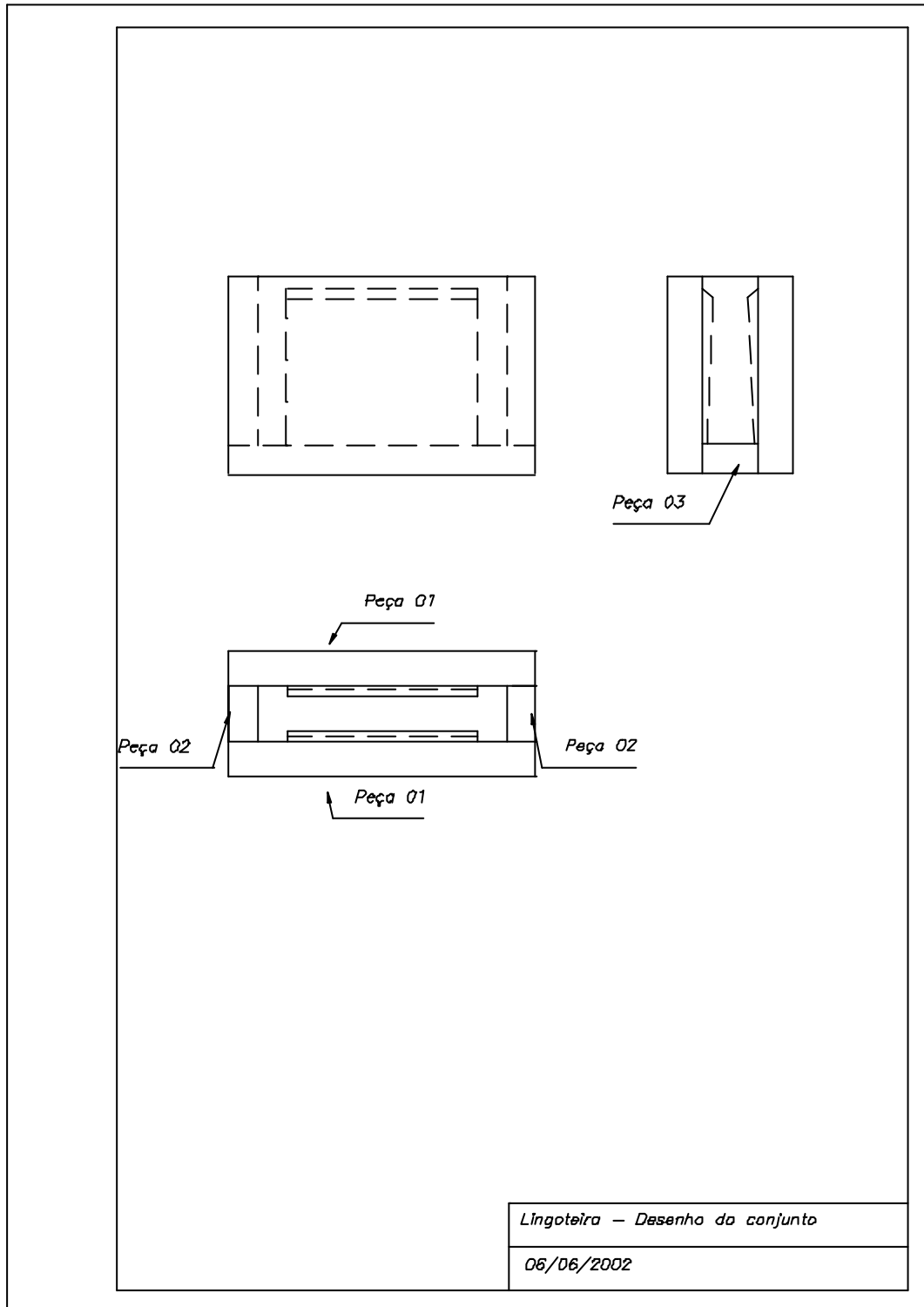
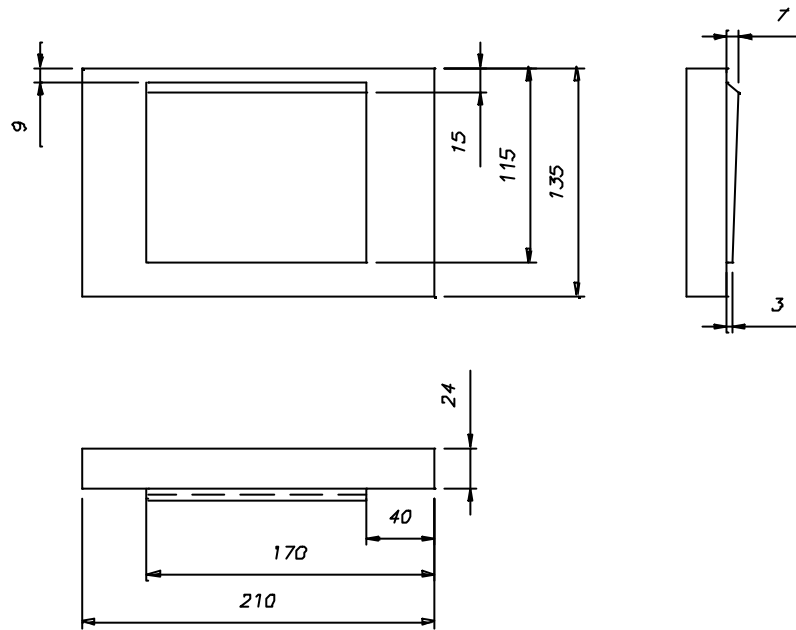


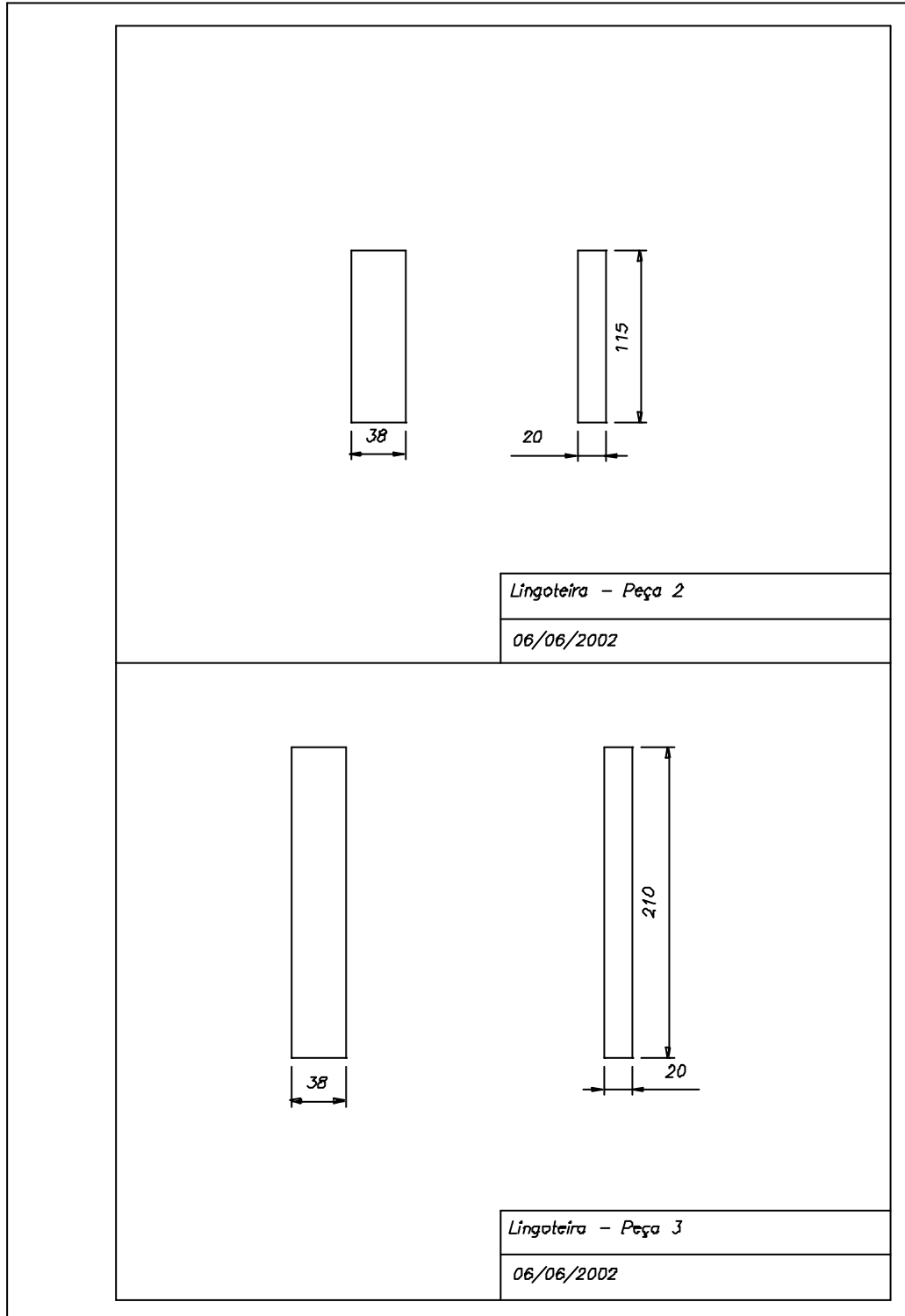
Figura.A.1.(a): Foto do conjunto da lingoteira. **(b):**Foto da lingoteira desmontada.

Desenhos da Lingoteira:





| |
|---------------------|
| Lingotéria – Peça 1 |
| 06/06/2002 |





Espectroscopia Atômica

Introdução

Em temperatura bastante alta a maioria dos compostos se decompõe em átomos na fase gasosa. Na espectroscopia atômica as amostras são evaporadas a 2000-6000K e as concentrações atômicas determinadas pela medição dos comprimentos de onda característicos de absorção e emissão, vide figura B.1. Aqui, será dado maior ênfase na emissão devida a sua aplicação no ICP (plasma acoplado indutivamente). A espectroscopia atômica é a principal ferramenta da química analítica, especialmente nas indústrias, devido à sua alta sensibilidade, capacidade de distinguir um elemento de outro numa amostra complexa, capacidade de executar análises multielementares simultaneamente e a facilidade com que várias amostras podem ser analisadas automaticamente. A medição de concentração do constituinte em partes por milhão é uma rotina, e níveis de partes por trilhão são alcançados algumas vezes nas análises.[27]

Emissão Atômica

Um átomo no estado fundamental tem seus elétrons no menor estado de energia possível. Este estado é aquele como as substâncias normalmente se apresentam na natureza. Entretanto, quando o átomo sofre alteração de energia, por exemplo, através de aquecimento resultante da colisão com os outros átomos, seus

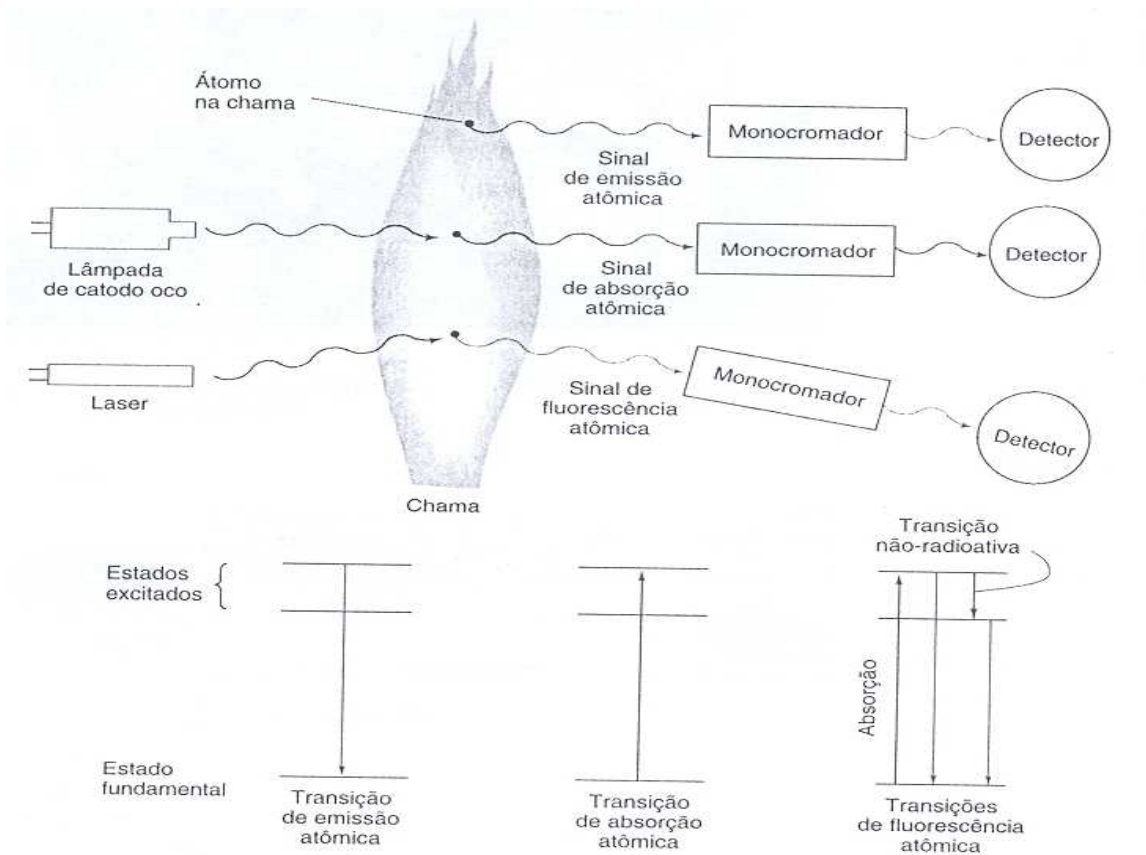


Figura.B.1: Representação esquemática da absorção, emissão e fluorescência de átomos numa chama. A emissão atômica é proveniente de átomos que estão em um estado excitado devido à alta energia térmica da chama.[27]

elétrons são promovidos passando a se mover numa outra órbita, de nível energético mais intenso, denominado “estado excitado”. O estado excitado possui uma condição de uma “partícula” de radiação eletromagnética conhecida como fóton. A diferença energética entre os dois estados é liberada pelos elétrons na forma de radiação que pode ser luminosa.[28]

Assim, a luz é emitida em comprimentos de onda típica de cada elemento químico. Estes comprimentos de onda são inversamente proporcionais ao espaçamento dos níveis de energia, ou seja, quanto maior for o caminho de retorno ao estado fundamental, menor será o comprimento de onda produzido. Na temperatura ambiente, não se constata a emissão de luz, por não haver energia suficiente para a promoção dos

elétrons a estados excitados. Mas à medida que se aumenta a temperatura, pode-se observar que um número crescente de elementos passa a emitir luz. Outro fator interessante é o fato do elemento passar a possuir espectro atômico, com um número cada vez maior de comprimento de onda. Por exemplo, Na, Li, K e Cs emitem luz a 2000K. Em 3000K, Na, Li, K e Cs passam a emitir luz de forma mais intensa, junto com a luz emitida por outros elementos, como Ca, Cu e Mg. [28]

Mas a partir de 5000K pode-se verificar um espectro mais rico em comprimento de onda de um mesmo elemento, como Ca ou Mg, e um aumento drástico da quantidade de elementos que passam a emitir luz, como Hg, Pb, e Al.[28]

Tendo já em mente que os comprimentos de onda emitidos pelos elétrons, quando estes retornam de seu estado excitado ao fundamental, caracterizam os elementos químicos, filtra-se esses comprimentos de onda no monocromador que por sua vez envia um sinal ao detector que codifica qual elemento foi notado e sua concentração em partes por milhão (ppm). A intensidade da emissão do elemento na amostra é proporcional à sua concentração. Geralmente são usadas curvas - padrão (Fig.B.2) para estabelecer uma relação entre o sinal e a concentração.[27,28]

Plasma Acoplado Indutivamente (ICP)

Por definição o plasma é um fluxo gasoso formado por íons, átomos e seus elétrons em estado altamente energizado mantido por um fluxo constante de argônio e pelo campo magnético gerado numa bobina de indução. O **plasma acoplado indutivamente (ICP)** na Fig.B.3a alcança uma temperatura muito maior do que as

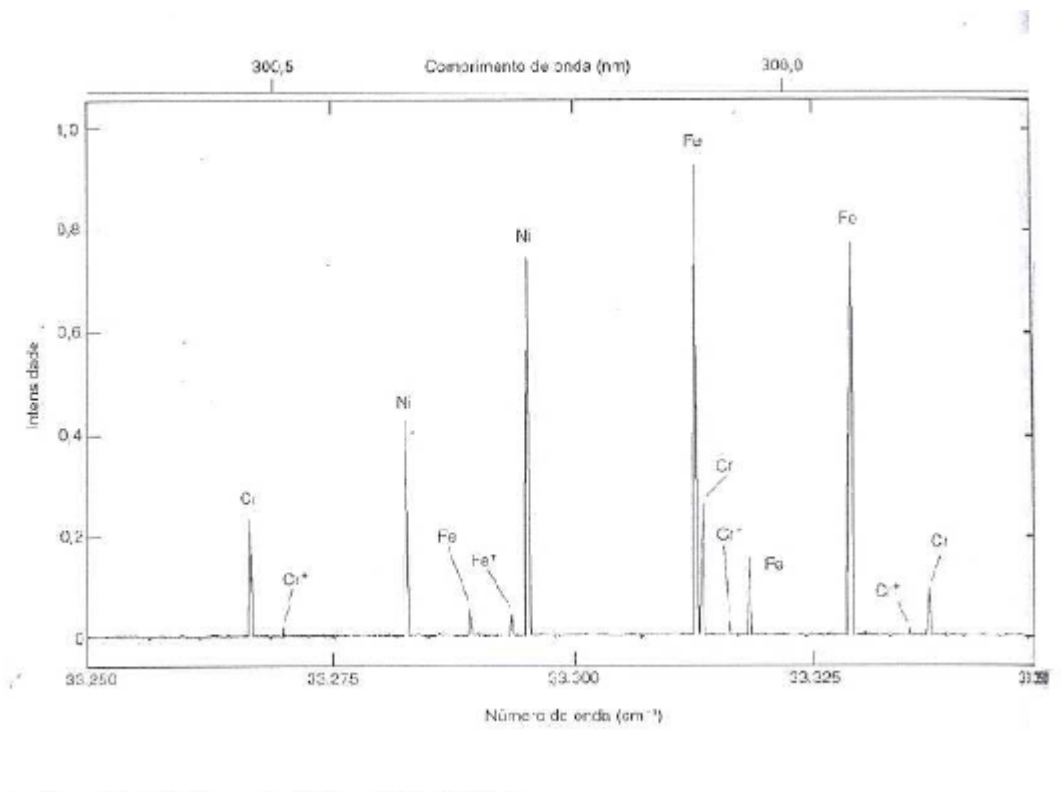


Figura.B.2: Pequena porção do espectro de emissão de uma lâmpada de catodo oco de aço, mostrando as linhas finas dos átomos de Fe, Ni e Cr gasosos e as linhas finas dos íons Cr⁺ e Fe⁺. [27]

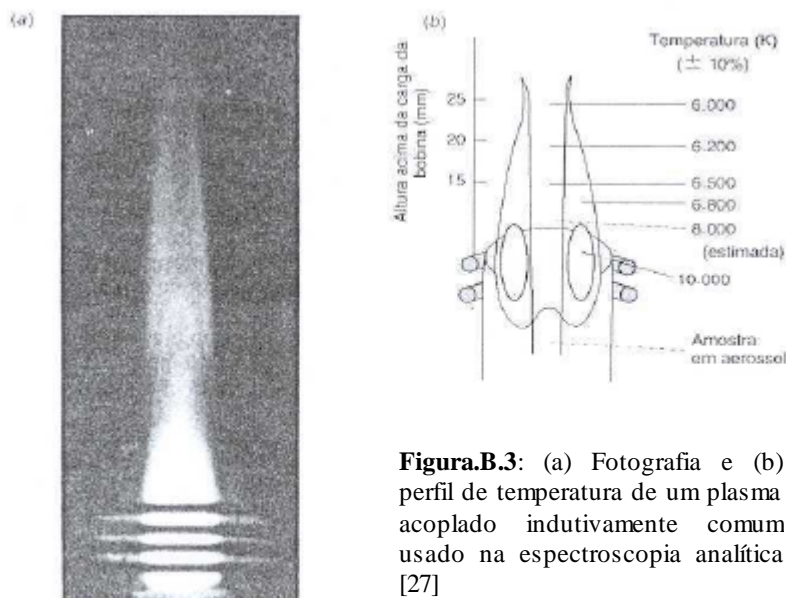


Figura.B.3: (a) Fotografia e (b) perfil de temperatura de um plasma acoplado indutivamente comum usado na espectroscopia analítica [27]

chamas de combustão comuns. Sua maior temperatura, estabilidade e o ambiente de argônio quimicamente inerte (pois pertence à família dos gases nobres) eliminam a maioria das interferências encontradas nas chamas de combustão. Os plasmas são usados quase exclusivamente para a emissão, porque a temperatura é alta o suficiente para excitar maioria dos elementos. As análises simultâneas de vários elementos estão se tornando rotineiras com os instrumentos de ICP. Devido as suas características adequadas, o plasma está substituindo as chamas na espectroscopia atômica. Vale mais a pena comprar e operar um instrumento de plasma do que um instrumento de chama.[27]

Tem-se na Fig.B.4 a vista transversal de um fomo de plasma acoplado indutivamente que mostra uma bobina de radiofrequência de duas voltas ao redor da

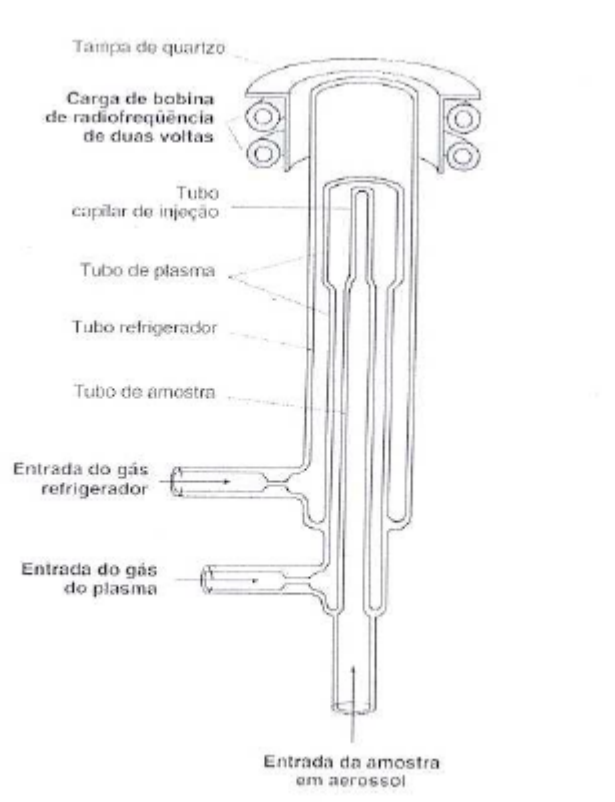


Figura.B.4 :Vista transversal de uma cabeça de queimador de um plasma acoplado indutivamente. O plasma é tão quente , que o queimador de quartzo deve ser protegido pelo gás refrigerante de Ar que circula pela face exterior do aparelho.[27]

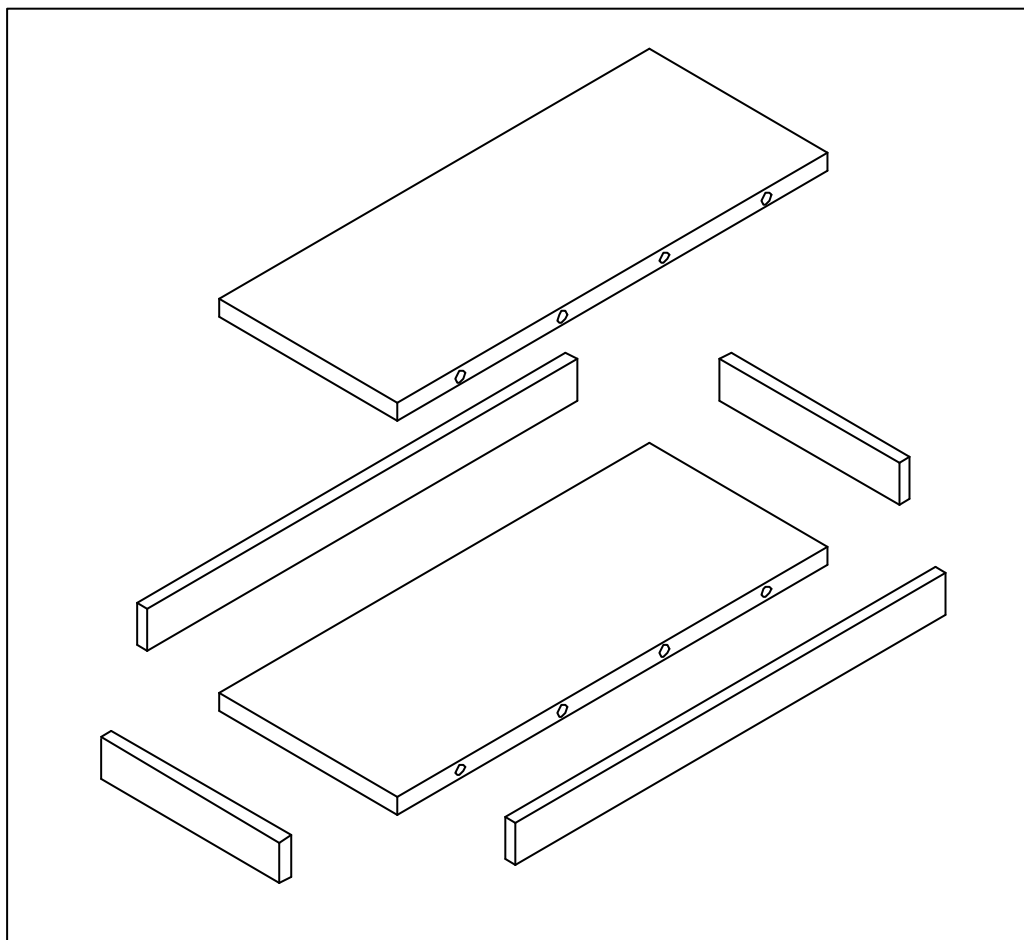


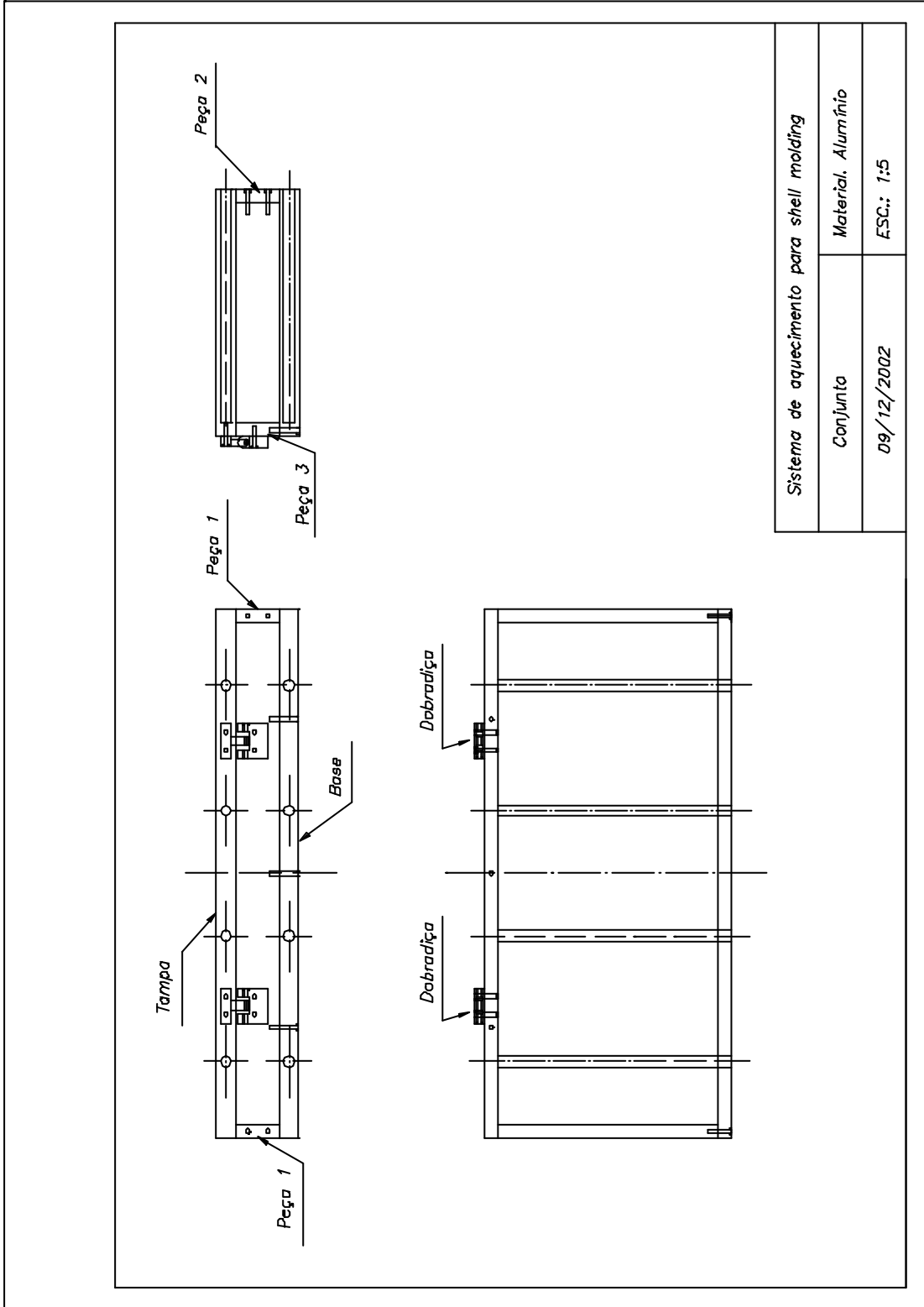
abertura da aparelhagem de quartzo. O gás Ar de alta pureza é alimentado pelo gás de entrada do plasma. Após uma faísca de uma bobina de Tesla, o gás Ar se ioniza e os elétrons livres são acelerados pelo potente campo de radiofrequência de 27Mhz que oscila sobre a carga da bobina. Os elétrons acelerados colidem com os átomos e transferem sua energia para o gás inteiro. Uma vez começado o processo, os elétrons absorvem energia suficiente da bobina para manter a temperatura de 6.000 a 10.000K no plasma[27] (Fig.B.3b), permitindo a completa atomização da amostra injetada gerando um espectro atômico extremamente rico em comprimento de onda de interesse analítico. Na teoria, todos os elementos podem ser analisados por ICP mas na prática há restrições, não podendo ser analisados elementos produzidos artificialmente, gases inertes e oxigênio, devido suas propriedades físicas e espectrais.[28]

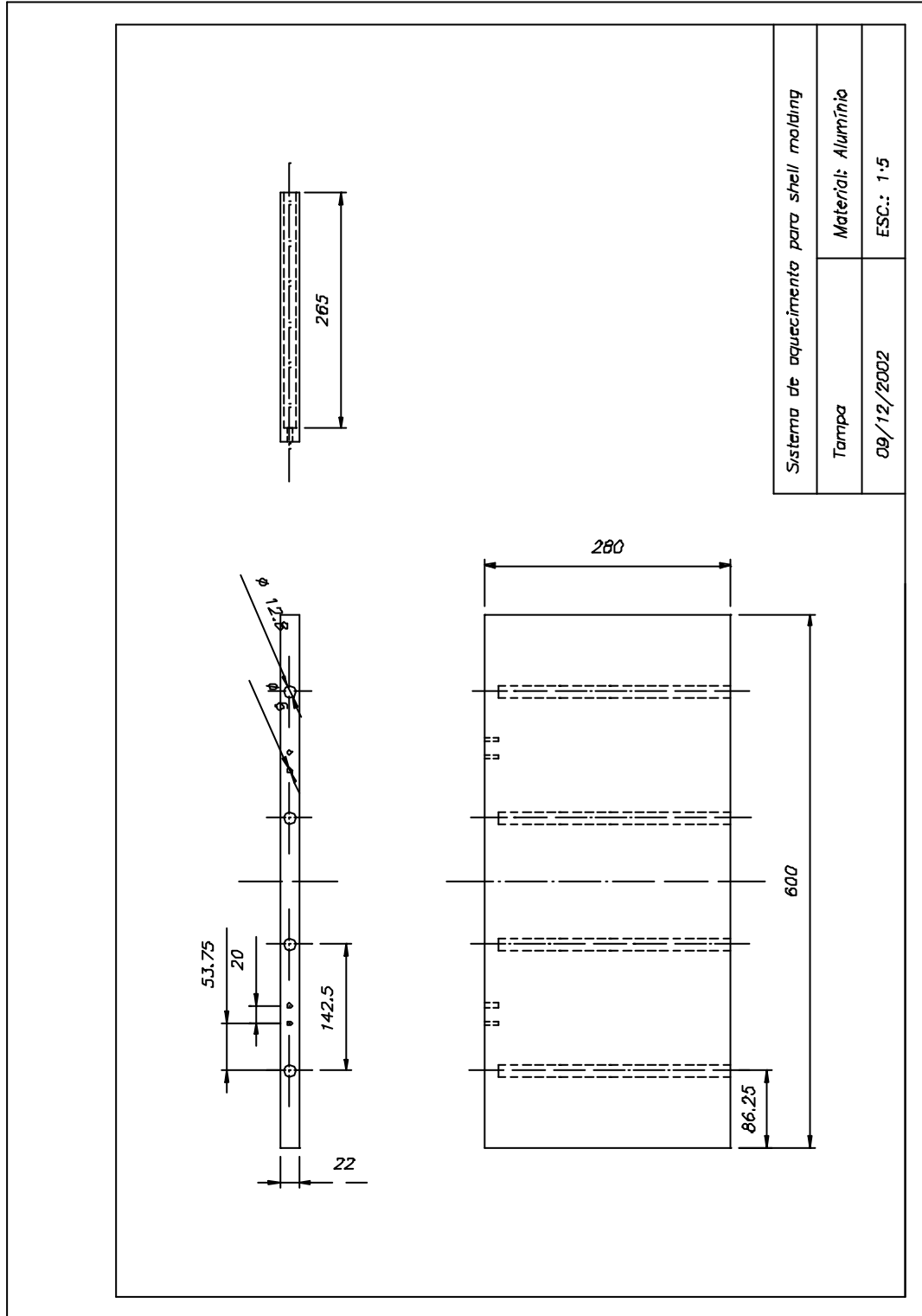
Apêndice C

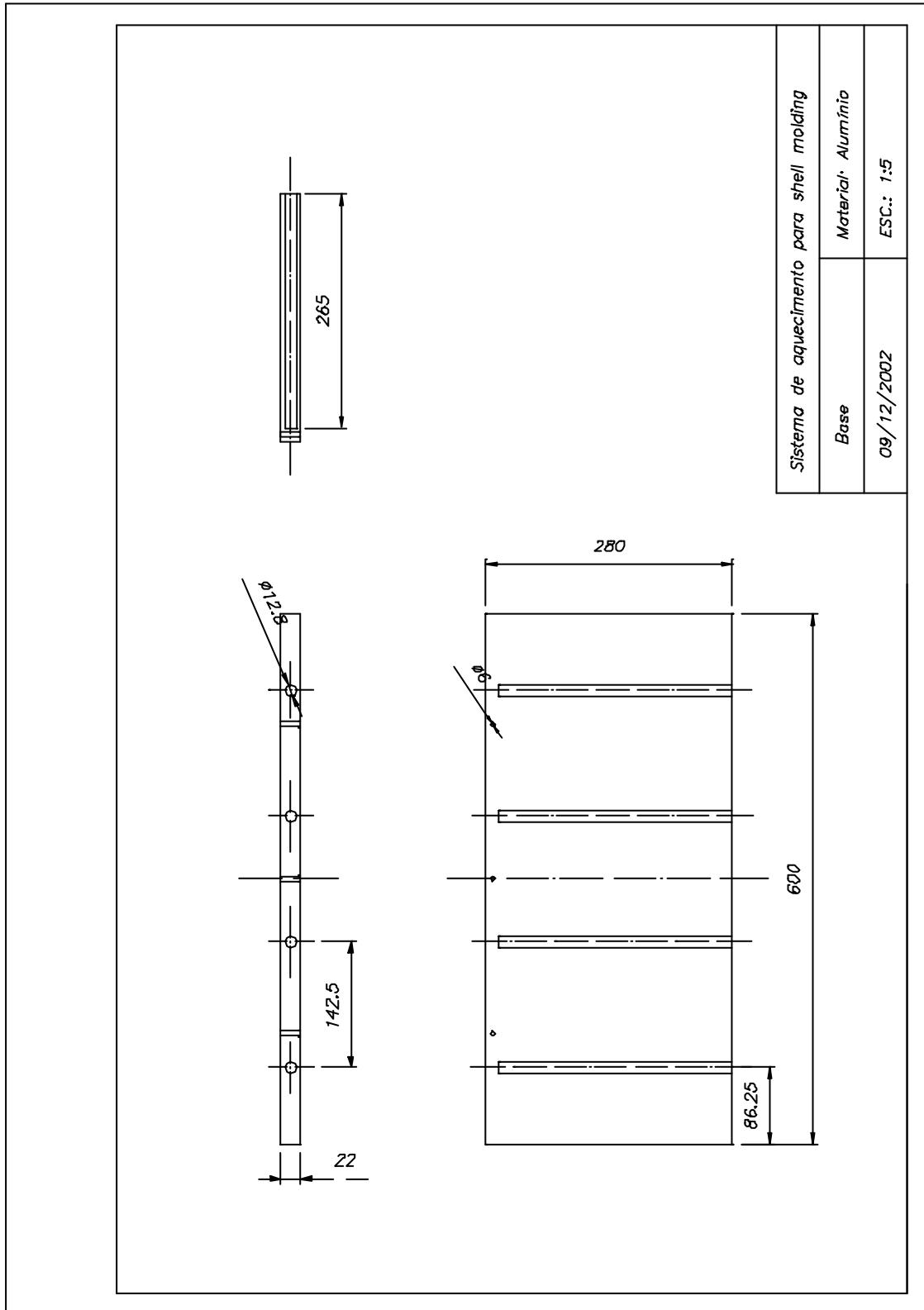
Procedimentos para obtenção de moldes “shell” para corpos-de-prova

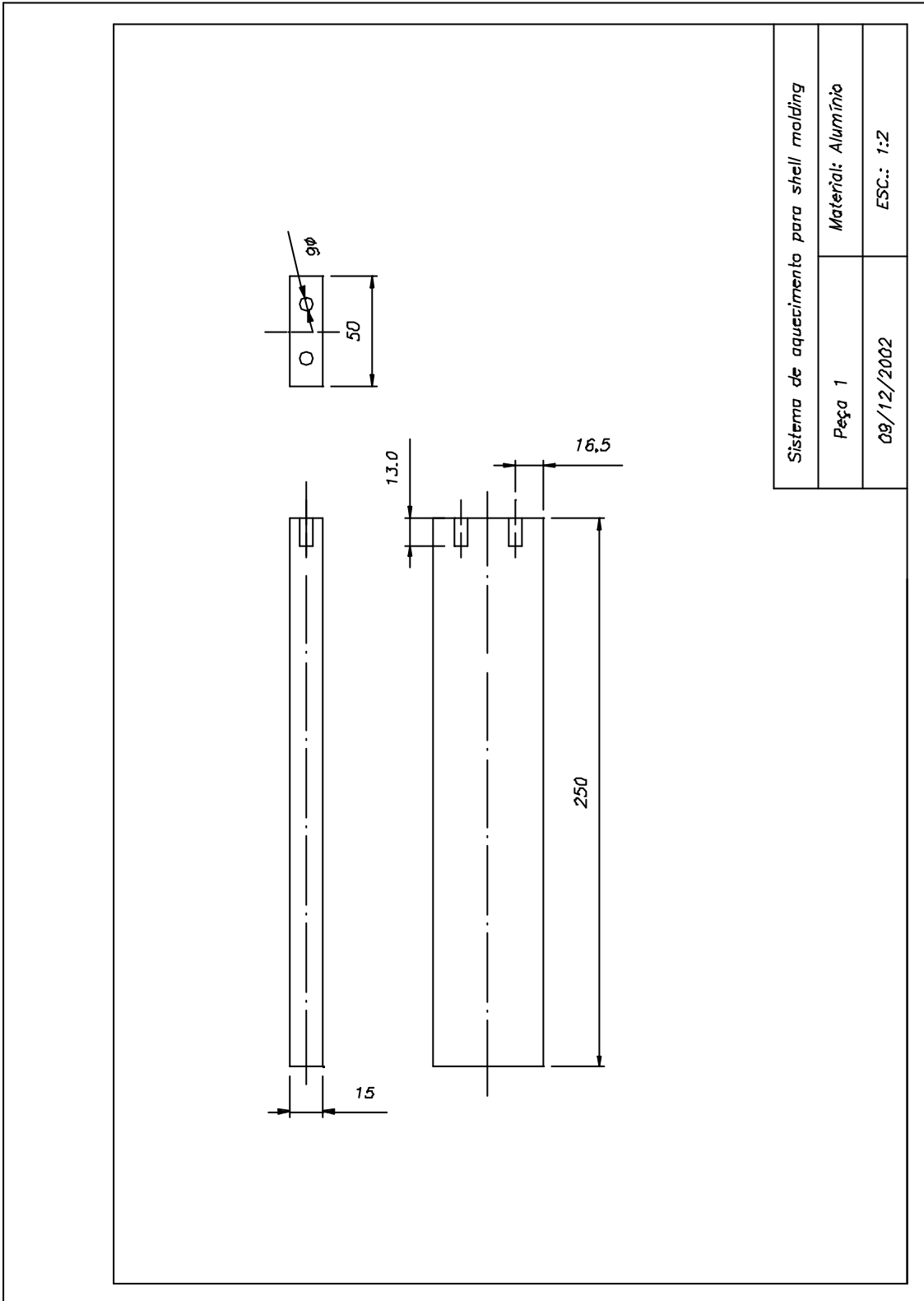
Para que sejam obtidos moldes “shell”, é necessário que a areia-resina seja curada. Para tal, foi elaborado um *sistema de aquecimento para shell molding*. Este sistema funciona como uma caixa de alumínio, que possui resistências-cartucho (350W/220v) na tampa e na base, a fim de aquecer o conjunto e assim curar a areia-resina. Primeiramente coloca-se o modelo para fundição sobre a base. A seguir, coloca-se a areia-resina até a topo da caixa, tira-se o excesso, e fecha-se a tampa para que o aquecimento tome início. Após este, abre-se a tampa, retira-se as laterais do conjunto e por fim, com cuidado retira-se o molde em casca. Um esboço do esquema é mostrado abaixo, e as dimensões do conjunto são tratadas com maior detalhe a seguir.



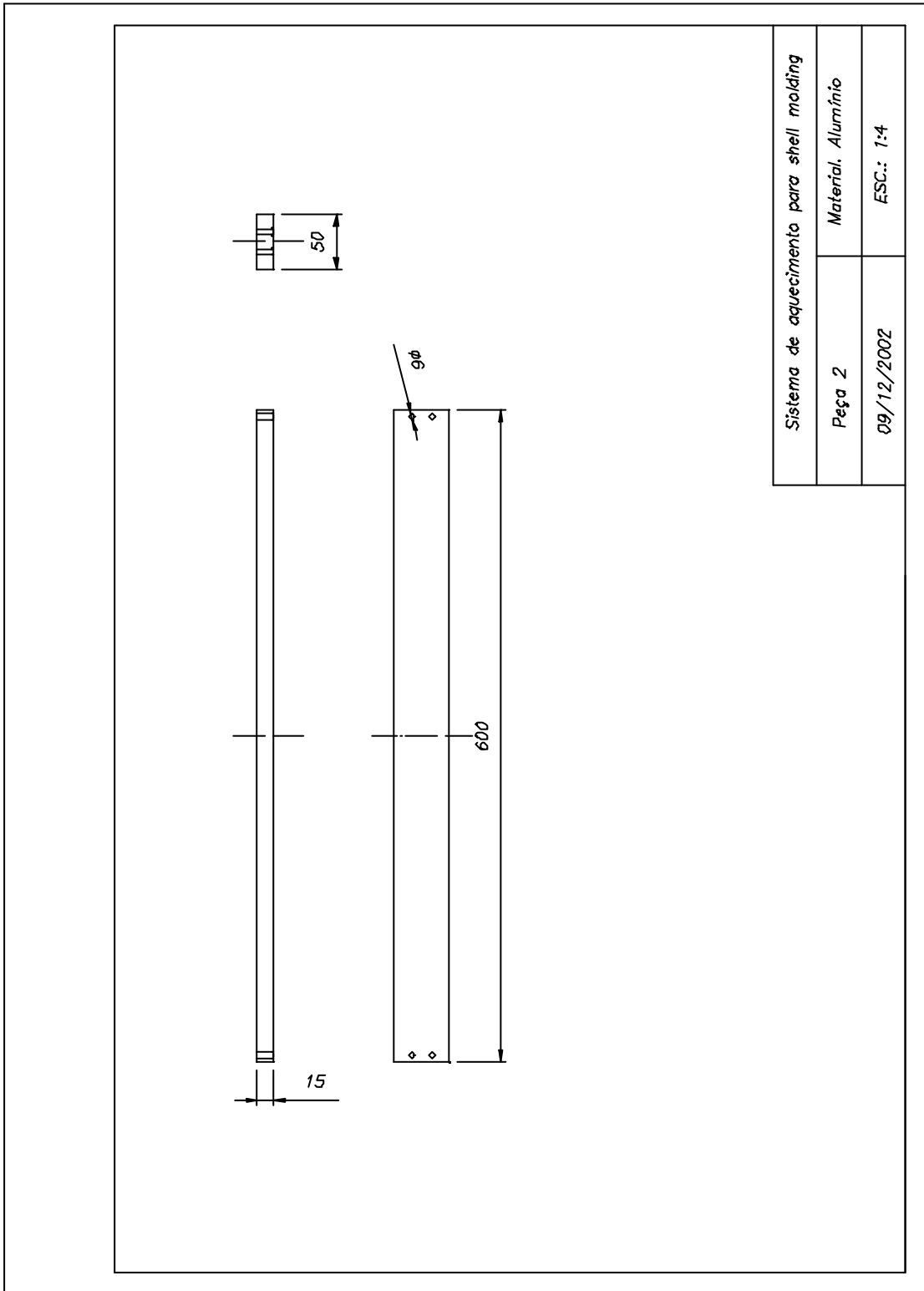




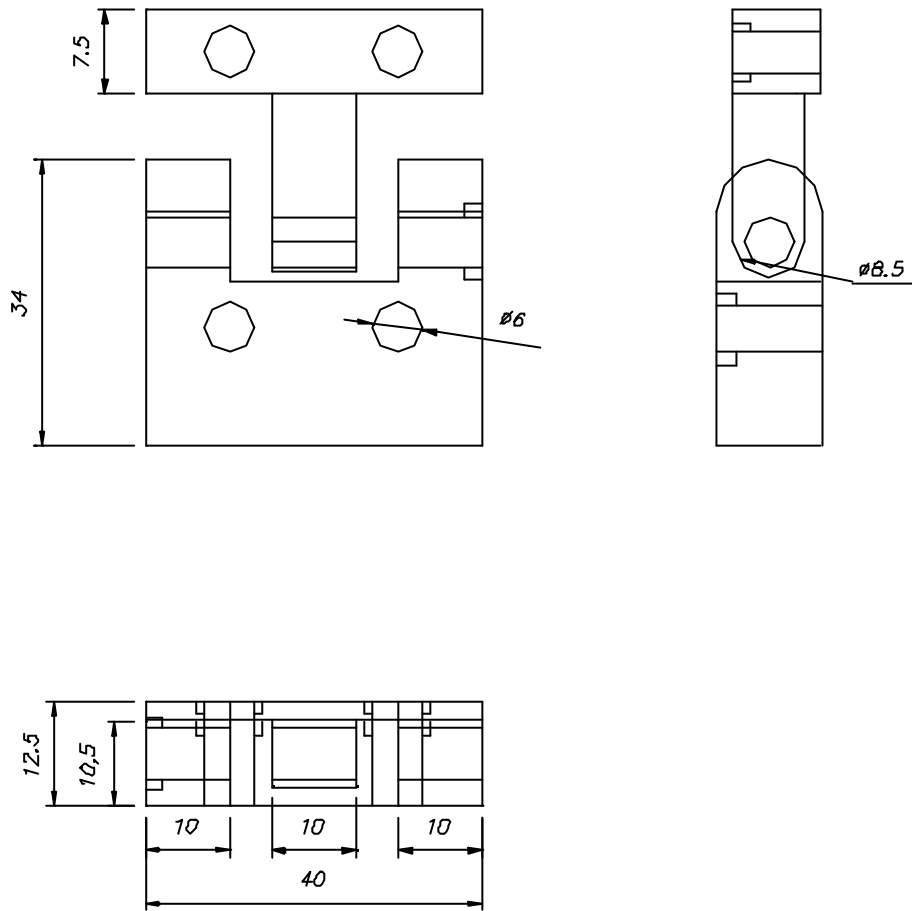




| | |
|---|--------------------|
| Sistema de aquecimento para shell molding | |
| Peça 1 | Material: Alumínio |
| 09/12/2002 | ESC.: 1:2 |



| | |
|---|--------------------|
| Sistema de aquecimento para shell molding | |
| Peça 2 | Material: Alumínio |
| 09/12/2002 | ESC.: 1:4 |



Sistema de aquecimento para shell molding

Dobradiça

Material: Alumínio

09/12/2002

Esc.: 1,5:1

Bibliografia

- [1]. WEINGAERTNER, Walter L., SCHROETER, Rolf B., *Tecnologia de usinagem do Alumínio e suas Ligas*. 2.ed. São Paulo: Alcan Alumínio do Brasil, 1991
- [2]. <http://www.alcan.com.br/brazil/corporate/sitebrasil.nsf/wInstitucional?openform&sitealcanbrasil&institucional&Comercial> (19/03/2002)
- [3]. http://www.abal.org.br/numeros/index.cfm?frame=numeros_reciclagem (21/08/2002)
- [4]. ASM specialty handbook, *Aluminum and Aluminum Alloys* DAVIS, J. R.(ed), 3 ed. Materials Park 1993. Cap. General Introduction
- [5]. L' ALUMINIUM ET SES ALLIAGES, 3ª.ed. Paris: L' Aluminium Français, p. 13
- [6]. <http://www.world-aluminum.org/production/processing/rolling.html> (21/08/2002)
- [7]. <http://www.world-aluminum.org/production/processing/extrusion.html> (21/08/2002)
- [8]. http://www.aluminum.org/Content/NavigationMenu/The_Industry/-Forgings/Forgings.htm (21/08/2002)
- [9]. DIETER, George E. *Metalurgia Mecânica* 2ª ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan S.A., 1981 p.563
- [10]. McGannon, Harold E. *The making shaping and treating of steel* 9ªed. Pennsylvania: United States Steel, 1971 p.840
- [11]. ASM specialty handbook, *Aluminum and Aluminum Alloys* DAVIS, J. R.(ed), 3 ed. Materials Park 1993. Cap. Wrough Products
- [12]. ASM specialty handbook, *Aluminum and Aluminum Alloys* DAVIS, J. R.(ed), 3 ed. Materials Park 1993. p.5, 88



- [13]. AMERICAN SOCIETY FOR METALS, *Aluminum: Properties and Physical Metallurgy* HATCH, J. E.(ed), 8.ed. Ohio: Metals Park: 1984. p.320, 321
- [14]. TORRE, Jorge. *Manual Prático de Fundição e Elementos de Preservação da Corrosão*. BEHAR, M. (ed), São Paulo: HEMUS – Livraria Editora LTDA 1975. p.133, 134, 71
- [15]. ASM specialty handbook, *Aluminum and Aluminum Alloys* DAVIS, J. R.(ed), 3 ed. Materials Park 1993. Cap. Alloy and Temper Designation Systems
- [16]. AMERICAN SOCIETY FOR METALS, *Aluminum: Properties and Physical Metallurgy* HATCH, J. E.(ed), 8.ed. Ohio: Metals Park 1984. p.136,137
- [17]. ASM specialty handbook, *Aluminum and Aluminum Alloys* DAVIS, J. R.(ed), 3 ed. Materials Park 1993. Cap. Properties of Wrought Aluminum and Aluminum Alloys p.700-704.
- [18]. ASM specialty handbook, *Aluminum and Aluminum Alloys* DAVIS, J. R.(ed), 3 ed. Materials Park 1993. Cap. Properties of Cast Aluminum Alloys p.725,726
- [19]. METALS Handbook, *Alloy Phase Diagrams*. ASM 2ªed. vol.3 : Materials Park p. 2.44, 2.52 .
- [20]. CAMPOS FILHO, Maurício Prates de. *Solidificação e Fundição de Metais e suas Ligas*. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1978. p.137
- [21]. BEELEY, P. R. *Foundry Technology* Southampton: London Butterworths, 1972 p.439-445
- [22]. BERNDT, Heinz *Processo Shell: Materiais e Tecnologia*. São Paulo : ABIFA/JUNDU, 1989. p.1, 3, 7, 11, 112, 215-217, 233.
- [23]. KONDIC, V. *Princípios Metalúrgicos de Fundição* . São Paulo: Editora Polígono SA, 1973. p.216



- [24]. COCKAYNE, J. *Fundamentals of foundry technology*. P. D. WEBSTER(ed)
1980 p.422-425
- [25]. ASM specialty handbook, *Aluminum and Aluminum Alloys* DAVIS, J. R.(ed), 3
ed. Materials Park 1993. p.20-24
- [26]. ASM specialty handbook, *Aluminum and Aluminum Alloys* DAVIS, J. R.(ed), 3
ed. Materials Park 1993. P.25-28
- [27]. HARRIS, Daniel C. *Análise Química Quantitativa*. 5.ed. Rio de Janeiro: LTS,
2001. Cap. 22, p.527-536.
- [28]. CIENFUEGOS, F., VAITSMAN, D. *Análise Instrumental*. Rio de Janeiro:
Interciência, 2000. Cap. 5, p.188-192.



Agradecimentos

A Deus, pela vida e pela capacitação que me deu. Aos meus pais, pelas orações, incentivo e ajuda. A minha família, pelo apoio essencial que me deram. Ao Prof. Dr. Rodrigo Magnabosco pela importante orientação que tive. Ao Centro Universitário da FEI, pelo patrocínio do projeto e concessão de bolsa de iniciação científica. Aos Técnicos do Laboratório de Materiais, Antônio M. Mirom, Marcos O. Gentil, Romildo de Freitas e Wanderlei.