

Programa da Cadeira de Hidráulica do Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas de Ouro Preto^(*)

PROF. JOSÉ DE CARVALHO LOPES

Eng.º de Minas e Civil.

(Belo Horizonte. M. G.).

CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

Poderia parecer, à primeira vista, que Hidráulica nara tenha a ver com Metalurgia. Puro engano. Há patentes pontos de contacto nas duas disciplinas. Pondo de lado que toda a engenharia deva, em seu aspecto cultural geral, tomar conhecimento da mecânica dos fluidos e que as usinas, como todo o organismo vivo, devem absorver e expelir líquidos, temos a considerar o aspecto da Hidráulica Industrial, maximé no tocante à complexa questão do combate a incêndios e relações destes com as companhias de seguro, influência do tipo de abastecimento d'água nas taxas de seguro contra fogo e, finalmente, a difícil questão das leis que regem os escoamentos industriais de metais em fusão, em tôdas as fases do processo em que tal estado do metal se faz presente e com especialidade o encaminhamento dos metais em fusão nos moldes de fundição.

Estes últimos fenômenos, como o bom senso o indica, seguem as complicadas leis do escoamento dos fluidos. A êste respeito mistér se torna lembrar que a Fluidomecânica, o nome o indica, trata de qualquer fluido, inclusive, é claro, o que resulta do estado de fusão dos meaaais. As leis são as mesmas da Hidrodinâmica, que, apesar da raiz do têrmo, é absolutamente geral para qualquer corpo no estado fluido. A bibliografia, a nosso ver, do que conhecemos é escassa, para não dizer quase inexistente. O que há em abundância, são monografias para determinados casos específicos de problemas que a indústria vai encontrando, e, principalmente, constando de artigos, sempre originais, de revistas, que pelo vulto e necessidade de complexa catalogação, se tornam praticamente inacessíveis a um pobre professor inflacionado. Nossas bibliotecas são deficitárias no assunto e mesmo que o não fossem, apenas professor em regime de tempo integral poderia meditar tão complexo campo de adaptação da Hidráulica a êsse capítulo importante da Metalurgia.

Primeiramente nós teríamos que indagar da natureza do escoamento, isto é, qual dos regimes em jôgo nas velocidades de fluxo ocorrentes nos metais em fusão, se o tranquilo (laminar) ou o turbulento (hidráulico). A relação do jôgo de fôrças pricipais em ação,

a de inércia

$$F_I = MJ = \rho L^3 v/t$$

e as viscosas

$$F_V = \mu S . dv/dx = L^2 . L/t . L$$

$$\frac{F_i}{F_v} = \frac{\rho L v}{\mu}$$

é necessariamente um número puro e função dos principais elementos definidores do fluido em movimento. Inteiramente independente do sistema de unidades adotado, esta expressão, que num escoamento se chama número de Reynolds, define o tipo escoatório, ressaltando o regime em jôgo. Estamos na mesma situação do grande médico francês Poiseuille quando indagou a que regime pertenceria o escoamento do sangue humano, assimilado o sistema artériovenal a tubos. Surgiu desta indagação um dos mais belos capítulos da Hidrodinâmica: o referente ao escoamento capilar, abordado quase ao mesmo tempo (1840 a 1850) pelo físico matemático alemão G. Hagen.

(*) Dos Anais da Escola de Minas de Ouro Preto.

Tomando números médios metalúrgicos, em unidades CGS, (canais de fundição), $v = 100$ e $d = 1$ cm, obteremos:

a) — Para o Alumínio, $\rho = 2,37$ e $\mu = 0,03$ poise

$$R = 7.900$$

b) — Para o Cobre

$$\rho = 7,81$$

$$\mu = 3,14 \text{ Centipoise}$$

$$R_{Cu} = \frac{vd\rho}{\mu} = \frac{100 \times 1 \times 7,81}{0,0314} = 24.872$$

c) — Para o Ferro

$$\rho = 6,98$$

$$\mu = 6,2 \text{ Centipoise}$$

$$R_{Fe} = \frac{vd\rho}{\mu} = \frac{100 \times 1 \times 6,98}{0,062} = 11.258$$

d) — Para o Chumbo

$$\rho = 10,51$$

$$\mu = 2,32 \text{ Centipoise}$$

$$R_{Pb} = \frac{vd\rho}{\mu} = \frac{100 \times 1 \times 10,51}{0,0232} = 45.302$$

Observa-se que em todos os exemplos citados, o Número Universal de Reynolds, isto é, aquele que corresponde à velocidade "crítica" e que oscila entre 2.000 e 3.500, é largamente ultrapassado nos escoamentos industriais encontrados na técnica metalúrgica. Nos condutos em areia para fundição, se quisermos particularizar e concretizar, o regime de escoamento é, portanto, essencialmente turbulento e tal conclusão se nos afigura da máxima importância para racional admissão do metal líquido nos moldes.

Poderemos ter uma outra idéia das condições descritas, e isto seria didático para os alunos, admitindo o Número Universal de Reynolds como prefixado e deduzindo a velocidade crítica resultante, para ser comparada com as ocorrentes na técnica metalúrgica. A fórmula de Reynolds daria:

$$u_c = \frac{R\mu}{\rho \cdot d} = \frac{2.300 \times \mu}{\rho \cdot 1} = u_c \text{ velocidade crítica.}$$

e, repetindo a fórmula obteríamos, respectivamente:

$$\text{para o Alumínio} \quad u_c = \frac{2.300 \times \mu}{\rho} = \frac{2.300 \times 0,03}{2,37} = 29,13 \text{ cm.}$$

e identicamente,

para o Cobre

$$u_c = 9,25 \text{ cm}$$

para o Ferro

$$u_c = 20,43 \text{ cm}$$

para o Chumbo

$$u_c = 5,08 \text{ cm}$$

Conclui-se, pois, identicamente, que as velocidades críticas, isto é, que nas condições citadas (d e μ) causam o regime laminar ou tranquilo, estão muito abaixo das encontradas em escoamentos industriais: 3 a 10 vezes menos. Estamos, pois, como já o dissemos, frente a regimes tipicamente turbulentos, também chamados "regimes hidráulicos" por envolverem mais de 90% dos escoamentos ocorrentes na hidrotécnica. A diferença é quase a mesma entre os escoamentos hidráulicos e aviatórios: médias oscilantes em torno de 10^5 e 10^6 respectivamente. Para escoamentos metalúrgicos e hidráulicos: 10^4 e 10^5 respectivamente, para os Números de Reynolds, que indicam os padrões escoatórios para efeito na semelhança fluidodinâmica. Cumpre observar que o termo aviatório empregado se refere às velocidades comuns de cruzeiro comercial, infrassônicas e não ao tipo "jato".

As considerações supra vêm comprovar por que, na técnica da semelhança fluidodinâmica entre escoamentos metalúrgicos e hídricos, recorre-se à semelhança completa: a modelos reduzidos, tendo sido usual a adoção da relação de semelhança $\frac{1}{2}$. ($\lambda = 0,5$).

A conclusão decorrente é que o ideal estaria em provocar na técnica metalúrgica, maxime nos processos de fundição, regimes tipicamente tranquilos, mas o estado atual da técnica ainda não resolveu, pelo menos satisfatoriamente, problema tão importante. Não seria difícil a investigação de dispositivos hidráulicos para a consecução deste "desideratum", e Ruddle chega a dedicar um sub-capítulo ao assunto, quando se refere a filtros ("strainers") e que melhor diríamos: *crivos*, os quais, além de amortecerem o escoamento, fazendo-o aproximar-se do regime tranquilo, têm a vantagem de retenção das micro-escórias que tanto inconveniente causam. O citado autor (ref. 1) apresenta 4 tipos do chamado "strainer-core", modelos de Tedds, com a dupla finalidade: moderar o regime escoatório e reter escórias ("dross"):

tipo (1): núcleo-crivo no topo da coluna ("spruce"), que diz ser sofrível para escórias e fraco para amortecimento.

tipo (2), com núcleo-crivo na base, dito bom para escória e sofrível para anti-turbulência.

tipo (3) no início do canal ("runner"), tido como bom para os dois efeitos e finalmente:

tipo (4) na base da coluna, em coroa lateral envolvente e percolação invertida do metal líquido, tido como bom para anti-escória e EXCELENTE para amortecimento escoatório.

Outro efeito decorrente vem a ser a moderação da "aspiração", fato importante no contróle dos gases, bolhas, etc. Este assunto ainda depende de muitos esclarecimentos ("requires experimental investigation") diz Rudle. O assunto do amortecimento para operação sob menor Número de Reynolds é realmente bem mais complexo que à primeira vista poderia parecer, pois também depende do jôgo térmico acompanhante do escoamento. Se este se opera mui lentamente, haveria tendência da massa fluida refrigerar-se e mesmo iniciar a solidificação. Tudo dependeria do tempo máximo pre-fixado nas normas para fundição, tempo que preveria o mais lento regime, digamos o menor n.º de Reynolds. Para levar em conta este "metabolismo" térmico teríamos que adicionar mais um termo na equação da energia (Bernoulli) e recairíamos, assim, no campo da Termodinâmica, bem mais complexo. Por outro lado, além do inconveniente da erosão nas paredes de condutos e moldes provocada por excesso de turbulência que pretendemos amortecer ou mesmo anular, aparece o inconveniente da variação do coeficiente de viscosidade com a temperatura:

$$\mu = f(t)$$

variação violenta, como sabemos.

Pesquisadores têm constatado, no caso de ligas de Cobre, que a influência da temperatura é praticamente desprezível, uma vez tomadas as precauções acauteladoras do congelamento. Noutros casos, como em ligas de Magnésio, existe uma temperatura "ótima" em torno de 790°C, de admissão, na qual ocorre o máximo de escoamento, embora se tenha atribuído a melhoria a causas indiretas como deslocamento de bolhas e formação de escórias. Presentemente ainda não se dispõe de base para patentear a influência da temperatura na admissão de metais fundidos. A teoria parece, todavia, mostrar que pelo menos não é preponderante o efeito.

No escoamento de metais fundidos em canais de areia para a admissão aos moldes na técnica da fundição, recorre-se, como o mostramos, à técnica de semelhança mecânica e modelos reduzidos. Torna-se claro que a experiência direta com metais fundidos não somente é anti-econômica, difícil, perigosa e de quase impossíveis tomadas locais de velocidades, como o rigor decorrente é discutível.

Contrariamente ao que ocorre geralmente na Hidrotécnica, é possível operar com modelos de tamanho natural ($\Lambda = 1$), embora, como vimos, seja de toda a conveniência operar-se com modelos reduzidos sob $\Lambda = \frac{1}{2}$.

Sendo, todavia, possível operar-se com relação de semelhança geométrica de $\lambda = 1$, seja dito: modelo de laboratório e original industrial de mesmas dimensões, forçando artificialmente a semelhança fluidodinâmica por dispositivos artificiais (núcleos-crivo, como vimos) ao invés de operar-se com tamanho menor, teremos tão somente as semelhanças de fluido e material dos ductos. Opera-se geralmente com água e agora nos propomos operar com ar, em nosso "Túnel de Vento", trabalhando com "semelhança aereo-

dinâmica". Sob o ponto de vista cinemático (viscosidade cinemática = ν/ρ) teremos os valores, em função da temperatura:

Substância	visc. cinem. = ν	Temp.
Ar atm.	17 centipoise	20°C
Mercurio	0,12	
Água	1	20
Alumínio	1,27	700
Fer f. cinz.	0,45	1300
Idem branco	0,40	1300
Cobre	0,40	1200
Ferro	0,90	1600
Magnésio	0,22	400
Chumbo	0,80	680
Ligas met.	0,1 a 1,5	50
Metal Wood	0,13	100
Zinco	0,55	500
Glicerina	700	20
Cl ₂ Zn — 34 %	8800	20

Do quadro supra resulta que o ar é 17 vezes mais viscoso que a água e (19) vezes mais que o ferro, o que não deixa de ser curioso. Dêmos os índices a para o ar e f para o Ferro e teremos, igualando os NR ($NR = n.º$ de Reynolds):

$$NR_a = NR_f \quad \text{ou} \quad \frac{V_a d_a}{\nu} = \frac{V_f d_f}{\nu_f} \quad (\nu = \text{nu} — \text{viscosidade cinemática.})$$

desta relação deduzimos:

$$\frac{d_a}{d_f} = \frac{V_f}{V_a} \times \frac{\nu_a}{\nu_f} = \frac{V_f}{V_a} \times 19$$

e se na fórmula supra fizermos $V_a = 19 V_f$ teríamos:

$$\frac{d_a}{d_f} = 1 = \lambda = \text{lambda}$$

e recairemos em modelos de laboratório aerotécnico de igual dimensão ao natural. Como as condições médias vistas preconizadas por Ruddle giram em torno de $V =$ um metro/seg, devemos operar, com nosso tunel de vento novo, na base de

$$V = 1 \times 19 = 19 \text{ m/s}$$

com modelos de tamanho natural, condições obtidas em excelente ponto de característica de nosso tunel de vento. Operando, como sempre o fazemos com álcool colorido de vermelho, de densidade 0,8, se fizermos $g = 10$ a coluna manométrica seria, com $V_a = 20$ m/s seria:

$$H = \frac{V_a^2}{16000} = \frac{20^2}{16000} = \frac{1}{40} \text{ do metro} = 25 \text{ milímetros.}$$

Bastaria, pois, manter-se o manômetro testemunha em 25 mm, e se operarmos com vidro ou "plexiglass" ou mesmo lucite, faremos a visualização com fumaça e a instalação de manômetros ao longo de todos os elementos do modelo dar-nos-ia as marchas da pressão e da velocidade, possibilitando a verificação da constatada depressão que causa a aspiração de gases já referida (experiências com água, Elliot-Mezzoff — 1948).

O recurso à similaridade hidro ou talvez aerodinâmica constitui o meio mais conveniente, o quase único praticável para as pesquisas preconizadas, ao invés de fazê-lo diretamente com o metal em fusão. No estabelecimento da semelhança, quer hidro ou aerodinâmica, cumpre observar que à nessa Cadeira e, pois, ao nosso programa que ora apresentamos, compete examinar tão somente o aspecto puramente hidráulico do problema e não o metalúrgico. Vale dizer que ao aluno se ministrarão somente subsídios básicos que permitirão boa compreensão dos fenômenos hidrodinâmicos que se passam em aplicações hidrotécnicas ocorrentes em metalurgia, quer relativos à Hidráulica propriamente dita (abastecimento e drenagem, suprimentos de vilas operárias, esgotos sanitários), quer aos industriais hidrofluidometálicos, prevenção de incêndios, etc.

Isto quanto à técnica. Se se tratar de pesquisa, no tocante aos mesmos assuntos, mistér se tornaria o trabalho em equipe de hidrotécnicos e metalurgistas.

O recurso à Semelhança se tornará, como vimos imprescindível, sob tôdas as suas formas e aspectos:

- a — Semelhança geométrica: modelo e original geometricamente semelhantes, $\lambda_L = 1$ ou maior que um.
- b — Semelhança hidráulica, isto é: trajetórias semelhantes nos dois modelos.
- c — Semelhança de fluidos. Laboratório operado com água ou mesmo ar como pretendemos e modelo original com metal fundido.
- d — Semelhança mecânica. Relação de massas em jogo, no original e modelo.
- e — Semelhança de material. Modelo industrial com areia de fundição ou coquília e laboratório com lucite, plexiglass ou outro material com aspereza artificial controlável.

Nessas difíceis experiências intervem um "demôniozinho" que tenta e mesmo perturba as condições previstas de similaridade: é a Tensão Superficial. Tornam-se, assim, os fenômenos ainda mais complexos com a intervenção da "tendência" na formação de películas de óxidos nas superfícies dos ductos, seja na "coluna" ("spruce", "masselot") no canal ("runner"), nas entradas ("gates") e na superfície dos moldes. A formação dessas "tenazes esquirolas" de óxido (Ruddle) além de outros inconvenientes, causa "espécies de artério esclerose" nos condutos de fundição (não podemos chamar de "canais" a aquadutos frequentemente sob pressão).

Aqui intervem, como preponderante, o Regime de Escoamento, que, se em demasia *turbulento* agrava a dinâmica de ditas esquirolas, fazendo-as deslocarem-se rompendo-se, causando arranhões e mesmo erosões prejudiciais à qualidade do produto final ("splashings" na literatura inglesa).

A tensão superficial de metais e ligas é bem mais elevada que a da água, de 6 a dez vezes mais. Tem-se observado, entretanto, que a similaridade não é em demasia afetada quando próximo do permanente, o regime. Poderá tornar-se a correlação de semelhança inexata intoleravelmente em se tratando do regime variado, que deverá ser evitado a todo transe.

A viscosidade CINEMÁTICA = $\frac{\mu}{\rho}$ de metais e ligas oscila no estreito limite de

0,1 a 1,5 centstokes e é bem menor que a da água, oleos e demais fluidos em geral. Já as do Alumínio e Magnésio se avizinham da água, donde a melhor conformação destes dois importantes metais à técnica da similaridade fluidodinâmica, sob reprodução quase perfeita do escoamento real industrial.

Sendo, pois, a viscosidade cinemática da água bastante superior à dos metais e ligas em fusão, HAVERÁ CONVENIÊNCIA no operar-se com MODELOS REDUZIDOS para mais se avizinham os números de Reynolds respectivos. Adota-se geralmente a relação $\lambda_L = 1/2$. Afirma Ruddle (ref. 1): "O problema do emprêgo da analogia hidráulica (com água) foi exaustivamente discutido por Swift que demonstrou serem os escoamentos da água, do Mercúrio e metais Wood em tubos plásticos (lucita, geralmente) praticamente idênticos. A visualização das trajetórias do escoamento é melhor vislumbrada pelo pó de Alumínio, em caso de baixos NR. Quando não se usa material transparente, restabelecem-se "janelas de lucite para observação do comportamento do escoamento". Alguns experimentadores têm adicionado pequenas partículas na água para simulação da presença de escórias

(Bochvar), empregando: carvão, partículas de borracha, chegando à conclusão de que melhores resultados são obtidos com cubinhos de 1,5 cm de borracha vulcanizada de densidade 0,98. Esta relação de densidades: *um* da água para 0,98 é paralela à das do Al para as escama de óxido formado".

Já o dissemos e repetimos que nossa Cadeira, e consequentemente o programa que abordamos, ocupa-se tão somente do aspecto puramente hidráulico do problema e não do industrial metalúrgico. Vale dizer que procuraremos incutir no aluno êsse "background" hidráulico, melhor fluido dinâmico, pelo qual adquirirá idéia mais concreta dos fenômenos escoatórios ocorrentes na Metalurgia. Uma dificuldade é patente: a necessidade da codificação de termos técnicos, isto é, duma terminologia que venha a abolir a confusão reinante duma indústria pioneira, por operários, dar um nome inadequado, não racional e a sanção da prática obrigar as normas a adotá-lo, de tão espalhado e corriqueiro. Não sabemos se nosso organismo normativo (A.B.N.T.) já apresentou o assunto, sinão completo pelo menos as chamadas "normas recomendadas", ainda eivadas do estágio de observação. Tivemos vaga notícia que a Ass. Bras. de Metais (A.B.M.) fez ou está fazendo algo neste sentido. Estamos, porém, afastados do assunto e não temos tido oportunidade de compulsar as suas publicações. Como exemplo aventemos o caso da técnica da fundição. Os elementos em jôgo são (esquema 1).

M = pouring-basin — funil de admissão.

A = sprue = *canal de descida*, a nosso ver incorreto, pois canal é essencialmente conduto sob escoamento livre. Diremos: ducto de descida.

N = Strainer-core = moderador-filtro. (Também "dros trapp" — retentor de escória).

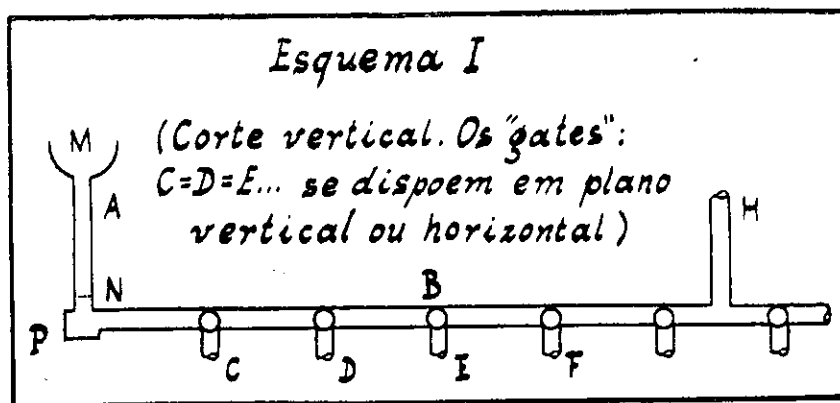
B = Runner = conduto de distribuição (seria um "manifold").

C-D-E-F = GATES = canais de entrada, diremos ductos de entrada.

H = Riser = montante (dupla função de suspiro (expelidor de gases) e compensador da retração devida ao resfriamento).

P = sprue-base = base do ducto de descida.

Uma das conquistas da fluidometaldinâmica foi o estabelecimento ou pelo menos a explicação de função do "Tapered-sprue", isto é o "ducto cônico de descida", função da depressão já explicada atrás no descrevermos o aparato Elliot-Mezzoff. No modelo submetido ao Tunel de Vento poderemos traçar a curva de depressão com todo o rigor e comodidade. Também se usa "conificar os "gates", neste caso a base maior do cona se voltando para o molde. Quanto aos compridos "runners" com derivação "multiple-gate", está claro que a sua conicidade, isto é, sua variação de diâmetro se calcula como a chamada "distribuição em marcha" da Hidrotécnica no caso das redes distribuidoras.



No esquema (1) tanto A como B podem assumir tendências diversas, inclusive a reversa (curva). As "entradas" ou "gates" poderão orientar-se vertical ou horizontalmente, donde até base para classificação, sistemas em que os "gates" se dispõem todos num plano vertical ou horizontal respectivamente.

Tem-se experimentado "sprues" de conicidade invertida: "reversed-taper-sprue" com base inferior maior ("big-end-down"), esta forma apresentando forte efeito de aspiração de gases. A conicidade normal, isto é, decrescente com o fluxo, elimina a aspiração, como já vimos.

Da máxima importância didática é anotar-se que longe estão os escoamentos fluido-metálicos dum regime rigorosamente permanente e tudo o que vimos e estatuímos pressupõe este estado e já vimos tornar-se o erro crescente quando se vai distanciando deste regime até um ponto em que o mesmo se tornaria intolerável. Na análise minuciosa d'ua moldagem, predominantemente em se tratando de peças de pequeno vulto, Eastwood separou três regimes mais ou menos entrosados:

a) *Fase perturbada*, a que já aludimos, durante a qual a frente de onda fluidometálica vai avançando, aceleradamente, atirando paredes, impulsionando ar e gases, provocando turbilhões e exidações. Trata-se de regime essencialmente danoso, ainda auxiliado pela tensão superficial, provocando a ruptura da película superficial de óxido. ESTABELECEU-SE EM 20.000 a fronteira Reynolds para esta fase.

b) Penetrada a câmara de moldagem o regime se torna menos turbulento. É a fase de transição, o seu *NR* estando entre 10.000 e 20.000

c) *Fase permanente*, quando os efeitos do enchimento da câmara de moldagem se fizeram sentir, regularizando o resto do escoamento ou tornando-o quase permanente. É o regime ideal. Regime ideal permaneceria entre 5 e 10.000 Reynolds.

Outro caso interessante de escoamento metalúrgico vem a ser, além dos fluxos ocorrentes nas áreas de corridas de Altos fornos (para gusa, p. ex.), e nos quais poderemos falar com propriedade em "canais", pois o escoamento é realmente *livre*, vem a ser, repito, o referente a caçambas alimentadoras de lingoteiras para aço. A teoria do "escoamento em orifícios" é aqui patente. De todo o interesse didático, e por que não dizer industrial, é verificação da influência do tamponamento (de fundo, naturalmente) e do coeficiente de escoamento, influenciado pelas incrustações nas paredes do orifício, e órgão "gating" ou válvula de controle da abertura. Dada a espessura de parede, verificar se a relação diâmetro/espessura se enquadra no caso de orifício ou bocal. Patentear bem a distinção dos três coeficientes: de velocidade = (β); de contração (α) e o produto de ambos = m = coef. de vazão, verificando a sua variação com o tempo ou o número de operações.

É interessante anotar que o método da medida de vazões de metais líquidos, preconizado por Ruff, vem a ser exatamente o das trajetórias. Corta-se o jato por uma tela horizontal, contando-se a partir da secção de descarga, a distância horizontal x coberta por n malhas e o desnivelamento vertical y , terse-á:

$$V = s \sqrt{\frac{2g}{y}}$$

donde a vazão. Importante é assinalar que a aproximação (êro) é da ordem de $\pm 5\%$. Grande vantagem do método vem a ser a visualização, pela oscilação do jato, das flutuações de vazão e, pois, da velocidade, o que não seria bem constatável noutros métodos. Outros métodos são: o da determinação do peso do metal escoado e o método elétrico, quer o baseado no "calado" de arame de altíssima resistência condutora e comparação de efeitos em oscilógrafos de raios catódicos (método Ohira), quer pelo encobrimento ou descobrimentos de contatos (método Kunin).

Finalmente desejamos referir-nos à influência do campo da mecânica dos gases em jôgo nas usinas metalúrgicas. Neste ponto é com certo desvanecimento que lembramos a importância que damos em nosso curso aos estudos e exercício da AEROTÉCNICA. Nossos Túncis de vento, quer o de Laboratório ou o modelo semi-industrial (de 12 KW = 16,4 HP), que funcionam constantemente durante o ano letivo, aí estão para o atestar. A familiaridade de nossos alunos com tubos de Pitot, Pitot-Prandtl, Micromanômetros, manômetros testemunhos (para compensar a influência da oscilação da corrente elétrica alimentadora), curvas de pressão e depressão em obstáculos a fluidos, polares de asa de avião e modelos de rotores de bombas, ventiladores, turbina-hélice, turbocompressores, aero e hidro-venturis, aero e hidro-Parshals, atritos em aeroductos e os cálculos, alguns complexos, que envolvem estes tratamentos, são coisas que nos desvanecem e nos enchem de alegria e gratidão para

com Diretorias que nos prestigiam, nem sempre sem sacrifícios, e vez por outra em detrimento de outras cadeiras igualmente importantes. Nesta aplicação aventaremos:

- a) Condução de ar dos reservatórios dos compressores para ventaneiras de Altos Fornos e tipos destas (semelhança aerodinâmica). Sopragem de Bessemers.
- b) Condução de gases de aparelhos metalúrgicos e siderúrgicos para tratamento dos mesmos e aplicações (motores, etc.)
- c) Condução de ar para aparelhos e máquinas operatrizes como martelo-pilões, marleteles, refrigeração, etc.
- d) Aplicação em problemas especiais, como condução do Azoto para prevenção de incêndios (caso a citar, de Monlevade).
- e) Para aplicação do ar condicionado.
- f) Aplicações várias, como o despoeiramento em ciclones, aparelho Van Tongeren, etc.
- g) Finalmente, estudo detalhado das máquinas pneumáticas, compressores e ventiladores, desde os de êmbolo até os rotativos, com ou sem palhetas guidoras, tipos centrífugos ou axiais, tipos especiais como os de engrenagem a que pertencem os da *classe Roots*, tão empregados na *siderurgia*.

Munto há, pois que aprender em assuntos do campo da Hidráulica, no curso de Engenharia Metalúrgica.

A importância da água é manifesta “universalmente”. Constitui o elemento essencial da vida, sem que, meio algum de cultura, dos Laboratórios inclusive, poderá sobreviver. No que concerne à indústria e, especificamente ao nosso caso da Indústria Metalúrgica, a água é indispensável para alimentação e higiene das Vilas Operárias e comunidade geral das Empresas, para limpeza, higiene e alimentação de usinas e oficinas, para refrigeração de motores e fornos, para prevenção e combate a incêndios, especialmente a proteção-vigilância automática (pelos “sprinklers”), dos perigosos depósitos de combustíveis.

Em todas estas manifestações a boa compreensão da Hidrotécnica e Fluidodinâmica é essencial e por bem houve a direção da Escola de Minas no introduzir a Hidráulica (Engenharia) como cadeira integral do currículo de seu Curso de Engenharia Metalúrgica.

O caso do nosso Parque Industrial Augusto Barbosa é típico em se tratando de reunir a didática à utilidade industrial. A água única natural que poderia servir a essa indústria metalúrgica seria de utilização praticamente impossível, poluída por resíduos industriais de fábrica de tinta e matadouro logo a montante. Sangrar as já minguadas redes municipais da Cidade de Ouro Preto não seria solução razoável e nem bastaria. Foi quando a administração apelou para nosso Gabinete de Hidráulica e nós aventamos, como solução definitiva, a perfuração de poço artesiano. A Divisão da Produção Mineral cedeu uma de suas rotativas e assumimos a orientação dos trabalhos no canteiro de sondagem onde os alunos tiveram participação ponderável, na construção do poço durante o ano letivo vigente e dos projetos definitivos no seguinte. Os resultados aí estão, afirma o Diretor da indústria: água excelente, independente, em razoável quantidade, que não obstrui ventaneiras, potável, podendo ser aumentada com a perfuração de mais um poço, já locado.

A boa compreensão fluidodinâmica intervém até em problema originais, como se deu na Usina Monlevade, quando da proteção dos maiores silos de carvão vegetal do mundo. Estudava-se a proteção contra incêndio, que, pelo vulto da obra se mostrava onerosa, quando se teve a luminosa idéia do aproveitamento do Azoto que se perdia em profusão, do processo dos novos convertedores para aço, subproduto até então sem aproveitamento. Fácil foi a processos fluidomecânicos a elevação do gás a algumas atmosferas para depois empurrá-lo para os silos por via duma adutora de alguns quilômetros, expandi-lo nos silos sob a massa de carvão, que ficaria, assim, envolta em atmosfera incombustível. Muito mais eficiente é uma ação preventiva que curativa, isto é, atacar-se a causa e não o efeito.

Para finalizar, diremos algo sobre o prefácio da grande e fundamental obra de RUDDLE (citação 1), cuja tradução também poderia ser: “Condutores e Alimentadores na Fundição em Areia”.

“Tem-se reconhecido que na prática da fundição em areia o modo por que o metal líquido é introduzido no molde é da maior importância e que, se a técnica da administração

adotada não é correta a fundição conterá defeitos. Até hoje somente a experiência andou presente. No que pese, porém, a sua reconhecida valia, ela por si só não constituiria seguro guia.

No decorrer de exaustiva pesquisas na produção de areia para moldagem a Assoc. Britânica de Pesquisa de Metais Não Ferrosos estudou numerosos fatores que afetam a qualidade do produto acabado, na fundição: preparo do metal, mecanismo e marcha do resfriamento, modo de alimentação e ocorrência de reações entre metal e material do molde.

Para esclarecimento e concretização desses fatos parece aceitável dedicar-se alguma atenção à prática da alimentação. Nos últimos anos pesquisadores orientaram investigações para o aspeto científico e fundamental das dificuldades nos condutores e alimentadores nas fundições e o acervo das informações publicadas utilizáveis foi compilado como preâmbulo para estudos de laboratório e aplicação de problemas do encaminhamento nos moldes.

Espera-se que este trabalho esclareça definitivamente quais os fatores que preponderam no arranjo dos sistemas de condutos e entradas em moldes e dêse modo facilite a tarefa paciente do fundidor ao decidir como orientar os fluxos alimentadores em suas fundições".

Citada a introdução supra ao Prefácio da excelente monografia de Ruddle, em que se estabelecem seguras bases para sérias e necessárias pesquisas, aqui transcreveremos nossas conclusões-bases para o Programa proposto.

- 1 — Imprescindibilidade do apêlo à Fluidodinâmica.
- 2 — Constatadas três fases, mais ou menos entrosadas, no encaminhamento dos metais em fusão para os moldes:
 - a* — Tumultuosa, *b* — mais calma, ainda sob regime variado enquanto não aparece a contra-pressão do enchimento, e *c* — sensivelmente uniforme.
- 3 — Correlativamente se notam três gamas de *NR* (*n.º* Reynolds):
 - a* — *NR* acima de 20.000, *b* — *NR* de 5.000 a 15.000, que é a fase propriamente "metalúrgica" (regime) e *c* — *NR* inferior a 5.000, regime tranquilo, ideal, difícil de obter-se.
- 4 — Imperioso o apêlo à técnica da "Semelhança e Modelos Reduzidos".
- 5 — Como fluido de similaridade, além da água, geralmente empregada, usar o metal WOOD já citado (fusão a 68°C) e proporemos o ar, no Tunel de Vento recentemente construído.

Como curiosidade, e não fosse tão dispendioso, proporíamos experimentar, na Escola, um programa de aplicação da citada liga Wood (metade *Bi* com 1/8 de *Cd* e mais *Pb* e *Sn*), com ponto de fusão a 68°C. Mais curioso ainda é considerar: *Bi* (p.f. a 271°C), *Pb* (p.f. 327°C), *Sn* (p.f. 232°C) e *Cd* com 320°C), reunidos, gerarem um produto com 68°C de temperatura de fusão. Mistérios dessa classe de "soluções sólidas" em que o maior constituinte é o "solvente" em cujas malhas cristalinas, perdida sua natureza inicial se aninham átomos do "soluto", arquitetando-se uma "estrutura" que a ação prescrutadora do *RX* revela à indiscrição dos insaciáveis olhos humanos.

Será que a nós, leigos, é que o fenômeno se nos apresenta mais cabalístico?

Delineadas as considerações supra, passemos ao nosso principal objetivo:

PROGRAMA DE HIDRÁULICA

CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA

Cadeira n.º ENGENHARIA HIDRÁULICA

- 1 Hidráulica teórica.
 - 1.1 Hidrostática.
 - 11.1 Considerações preliminares, Da Fluidomecânica e suas subdivisões. Fluido: estado e principais propriedades. Transformações isotérmicas e adiabáticas. Propriedades, com especialidade da água, do ar e dos metais sob fusão; tensão superficial; viscosidade e sua importância. Tabelas. Fluidos perfeitos e reais. Tabelas.

- 11.2 Pressão em superfície. Pressão num ponto da massa fluida e arbitrariedade de seu sentido de ação. Distribuição da pressão em condutos de descida, de distribuição e entradas, na técnica da fundição.
- 11.3 Hidrostática. Equação geral; formas cartesiana e vectorial. Superfícies de nível. Fluidos pesados e diagrama das pressões. Caso dos metais em fusão. Linhas de pressão em canais e condutos de fundição.
- 11.4 Pressão em superfícies planas. Centros de gravidade e de pressão. Pressão resultante. Aplicação aos casos de barragens e comportas.
- 11.5 Equilíbrio de corpos submersos. Condições de equilíbrio. Princípio de Arquimedes e demonstrações. Diagrama de ligas binárias, ternárias, etc. e exemplos de flutuação. Problemas de aplicação.
- 11.6 Equilíbrio de corpos flutuantes. Condição de flutuação. Condições de equilíbrio e estabilidade. Prismas flutuantes. Fusão de ligas consideradas soluções sólidas. Condições de equilíbrio e de estabilidade. Prismas flutuantes.
- 1.2 Hidrodinâmica.
 - 1.21 Da aceleração, das massas e sua significação. Equação geral do movimento dos fluidos perfeitos. Equação fundamental da Hidrodinâmica. Variáveis em jogo. Regimes de escoamento. Regime amplamente variado. Regime transitório. Regime permanente ou estacionário. Regime uniforme. Teorema de Bernoulli e transformação da energia. Plano de energia.
 - 1.22 Teorema de Bernoulli com fluidos naturais ou reais. Degradação da energia. Regras de Bresse. Plano de energia. Perdas de energia e de pressão. Linhas piezométricas e de energia, efetivas e absolutas.
 - 1.23 Equação geral do movimento sob regime permanente gradualmente variado, aplicado a fluidos reais ou naturais. Expressão geral da perda de energia: formas diferencial e finita.
- 2 Hidráulica Aplicada (Hidrotécnica).
 - 2.1 Circunstâncias acidentais no movimento dos fluidos. Casos de inaplicabilidade da equação geral.
 - 2.11 Orifícios. Classificação. Paredes delgadas e espessa. Teorema de Torricelli. Contração da veia. Paredes espessas. Grande e pequena abertura. Coeficientes de vazão. Dos escoamentos fluidometálicos ocorrentes em metalurgia.
 - 2.12 Alargamento súbito da secção. Perdas de pressão e energia. Tabela e gráfico de casos práticos.
 - 2.13 Estreitamento súbito da secção. Perda de carga. Tabela.
 - 2.14 Tubos adicionais (bocais). Classificação. Bocal de Borda. Bocais cilíndricos exteriores. Coeficientes de velocidade e vazão; comparação com orifício. Experiências de Venturi. Relação diâmetro-comprimento e condição de bocal; perda de energia.
 - 2.15 Escoamento de metais em fusão no caso de orifícios e bocais. Enchimento de lingoteiras, etc.
 - 2.16 Vertedores. Definição. Classificação. Paredes: delgada e espessa. Contração. Vertedor trapezoidal. Fórmulas práticas principais (Boussinesq, Bazin, Rehbock, etc.). Vertedores trapezoidal e triangular. Vertedor de Cipoletti.
 - 2.17 Perdas localizadas. Caso de curvas, cotovelos, registros, reduções, válvulas, etc. Descargas de reservatório.
 - 2.2 ENCANAMENTOS. Definição. Generalidades. Tipos das normas brasileiras. Aplicação aos encanamentos da equação geral do regime permanente. Regimes de escoamento. Sua definição pelo Número de Reynolds. Regime amplamente variado. Dos regimes de escoamento ocorrentes na Metalurgia. Tabela de propriedades físicas dos metais e ligas mais comuns. Densidade e viscosidade. Tendência para o estabelecimento dum regime ideal em canais de fundição. Terminologia dos elementos condutores em metalfluidodinâmica. Aplicação da semelhança fluido-mecânica em escoamentos metalúrgicos.
 - 2.21 Equação geral dos escoamentos. Fórmula geral. Formas práticas principais: Flamant e W. Hazen. Fórmulas de Focheimer e Manning. Fórmulas antigas. Ábacos de pontos alinhados.
 - 2.22 Dos encanamentos composto, misto e complexo e suas aplicações práticas.
 - 2.23 Caso da vazão virgem. Problema das adutoras.
 - 2.24 Problema dos três reservatórios e generalização (Bélanger).
 - 2.25 Caso da vazão variável. Redes distribuidoras. Condutos de distribuição para moldagem múltipla. Condutos de descida e entrada nos moldes. Distribuição em marcha. Reservatório de socorro.

- 2.26 Dispositivos artificiais para alteração da vazão nos condutos de fundição (crivos moderadores e retentores de micro-escórias).
- 2.27 Dos condutos aerodinâmicos ocorrentes na Metalurgia. Alimentação (insuflação) de altos-fornos, cubilots, convertedores. Alimentação pelo fundo, por lanças (bôca) e lateral. Pressões e volumes de ar necessários aos vários elementos metalúrgicos. Perdas de pressão e energia. Fórmula de Harris e tabelas de Hitchcock.
- 2.3 CANAIS. Definição. Históricos. Diferenças essenciais entre encanamento e canal. Equação geral do regime permanente em canais. Regime uniforme. Fórmulas principais: Hazen, Bazin, Manning, etc. Fórmulas antigas e modernas. Forma geral.
- 2.31 Canais em metalurgia. Canais em áreas de corrida, nos fornos. Dos imprópria-mente chamados canais na técnica da fundição.
- 2.32 Aquedutos. Formas várias. Aquedutos de drenagem e despejo em subsolos de grandes usinas.
- 2.33 Do regime variado em canais de grandes largura. Remontes e rebaixos e tabelas correspondentes (Rullman e Tolkmitt).
- 2.34 Dos cursos naturais e sua regularização, para abastecimento e prevenção de enchentes.
- 2.4 Condução, especialmente elevação mecânica da água. Justificação do problema. Cálculo de encanamento elevatório, tipo adutora e "penstock". Tipos de bombas e sua classificação.
- 2.41 Preceito do "custo mínimo" nas elevatórias. Curvas características de bombas conjugadas com tubos. Bombas em paralelo e série e características.
- 2.42 Elevatórias para consumo industrial.
- 2.5 Captação subterrânea. Sua importância e histórico. Da hidroscoopia através da história. Varinha mágica e radiestesia.
- 2.51 Classificação de lençóis subterrâneos. Conceitos: popular e técnico. Granulometria do "mantle rock".
- 2.52 Esboço geológico necessário à compreensão da Hidrogeologia.
- 2.53 Captação dos lençol freático e tipos de "filtro-subterrâneo".
- 2.54 Captação dos lençóis artesianos.
- 2.55 Tratamento analítico sumário dos lençóis subterrâneos. Profundidade útil e níveis: estático e dinâmico.
- 2.56 Bombeamento da água subterrânea: pneumático (Air-lift).
- 2.561 Cálculos de submergência e do consumo de ar.
- 2.562 Cálculo das colunas elevatórias: pneumática e de emulsão. Posição da luva de redução.
- 2.57 Cálculo dos compressores e de usinas elevatórias completas, para cidade e indústria.
- 2.58 Emprêgo de bombas centrífugas de eixo vertical.
- 2.59 Electrocentrífugas com motor de tampo e motor submerso. Comparação com o Air-lift.
- 2.5.10 Importância industrial do Air-lift (elevação pneumática), para água e fluidos agressivos.
- 2.6 HIDROMETRIA. Princípios da Hidrometria. Medição de pequenas e grandes vazões; orifícios, vertedores e diretamente. Hidrometria dos cursos d'água. Método de Serv. Águas do Min. Agric. Contadores: doméstico e industriais. Hidrômetros grandes e pequenos conjugados. Vantagens do uso de medidores.
- 2.7 ABASTECIMENTO.
- 27.1 Estudos hidrológicos. Escolha de mananciais. Condições para um bom manancial. Comparação com captação subterrânea.
- 27.2 Potabilização da água. Decantação, natural e artificial, filtração (lenta e principalmente rápida). Cloração. Amoniação. Correção do Ph.
- 27.21 Suavização da água, para a indústria em geral e para caldeiras. Desmineralização pela troca iônica, para usos de laboratório e industrial.
- 27.22 Desinfecção de água por irradiações: ultravioleta, ondas curtas, infrassônicas, etc.).
- 27.3 Captação e adução.
- 27.31 Da reservação da água. Tipos e fins dos reservatórios distribuidores. Cálculos: analítico e gráfico da compensação. Consumo horário em cidades e indústrias.

- 27.4 Da recuperação da água na indústria como auxiliar da reservação. Tipos de recuperação e taxa da mesma em função da indústria.
- 27.41 Química da água e padrões: potável e industrial. Alcalinidades: normal, dos bicarbonatos e cáustica: meio de discerni-las.
- 27.5 Abastecimentos de núcleos industriais.
- 2.8 ESGOTOS SANITÁRIOS. Necessidade. Definição. Classificação. Dos resíduos industriais e necessidade dum código para regular seu pré-tratamento para lançamento em redes sanitárias e cursos. Casos críticos conhecidos.
- 28.1 Comparação dos sistemas Unitário e Separador.
- 28.2 Da feição topográfica e adaptação de tipos de rêsdes, para núcleos industriais. Limites de declividades, velocidades e diâmetros.
- 28.3 Cálculo de rêsdes sanitárias.
- 28.4 Tipos de poços de visita, fluxíveis, e dispositivos para ventilação das rêsdes.
- 28.5 Materiais empregados. Orçamento.
- 28.6 Noções sôbre tipos de esgotamento mecânico.
- 28.7 Fossas septicas modernas, industriais e domésticas (Oms, etc.).
- 28.9 Tratamento de águas residuais. Tipos de dejetos e correção. Decomposição aeróbia e anaeróbia. Oxigênio dissolvido e BOD (biochemical oxygen demand e sua significação e importância).
- 28.10 Resumo dos métodos de tratamento (gradeagem, decantação, digestão, lamas, cloração, etc.), com aproveitamento dos gases e rural das lamas e incineração. Lagoas de oxidação (ox. ponds).
- 28.11 Tratamentos especiais de resíduos industriais. Resíduos típicos de usinas metalúrgicas.
- 9.9 DRENAGEM: Definição. Águas do subsolo e superficiais. Secções típicas e materiais empregados. Tubos furados e juntas sêcas, com pedras sêcas.
- 2.91 Hidráulica dos sistemas de drenagem. Escoamento subterrâneo. Distância e profundidade dos tubos drenantes.
- 2.92 Sistemas de rêsdes de drenos. Transversais e longitudinais.
- 2.93 Drenagem de aeroportos.
- 3.0 Saneamento de edifícios. Água e esgôto em grandes núcleos industriais. Proteção e prevenção contra incêndios.
- 3.1 Proteção contra incêndios nas indústrias. Segurança de depósitos de combustíveis. Caso dos combustíveis sólidos. Dispositivos automáticos de segurança contra incêndio: sprinklers, hidrantes, Vazões (fórmula) da Comissão Americana de Seguradores Contra Incêndio (National Board of Underwriters).
- 3.2 Reservação especializada de água com fim de redução de taxas contra incêndio, nas indústrias.
- 4. SEMELHANÇA FLUIDOMECÂNICA E MODELOS REDUZIDOS. Definição. Relações de semelhança. Aplicação ao caso de escoamentos ocorrentes na Metalurgia. Semelhanças: geométrica, mecânica, hidráulica, de fluidos e de materiais. Semelhança hidráulica (empregando água nos modelos reduzidos). Semelhança aerotécnica (empregando o ar) no tunel de vento.
- 4.1 Aerodinâmica dos condutos industriais particularmente metalúrgicos. Quantidades necessárias de ar para os vários fins; pressões. Condutos alimentadores de fornos. Perdas de energia: em curvas, tês, reduções, registros, etc. — Tubo de Pitot-Prandtl.
- 5.1 Exercícios práticos no laboratório e tunel de vento.

REFERÊNCIAS

- 1) — Ruddle (R. W.) — Condutos e entradas na fundição em areia. The Institute of Metals — Monogr. and Report Series n. 19. Londres. 1956.
Obs.: para os que admitam melhor tradução do título (não o achamos fácil...) aqui vai o original: "The Running and Gating of Sand Castings".
- 2) — Tenot (A.) — Mécanique Physique des Fluides — 1.º vol. parte geral. Dunod. Paris — 1939.
- 3) — Gomes (M. R.) — Informes pessoais e notas, as seis que seguem: números: 4-5-6-7-8. (Gomes é diretor do Inst. Met. da U. M. G.).
- 4) — ABM (Associação Brasileira de Metais) — bolet. 4 — julho 1946-pg. 33. Tipos e exemplos de peças para fundição.

- 5) — ABM — bol. 14, janeiro 949 pg 41. Estudo do dimensionamento dos canais de alimentação de peças fundidas. (canais?, diremos).
- 6) — Hunnicut (Horace) — Ferro fundido com Niquel. (com termos em português).
- 7) — Briggs (—) The Metalurgy of Steel Castings — Mc Graw Hill — 949.
- 8) — Heine & Rosenthal — Principles of Metal Castings — Mc Graw Hill — 955.
- 9) — Dwyer (P.) — Gates and Risers for Castings-Penton Publish. Co-London, 949.
- 10) — Jennings (J.) — The Reynolds Number: its Meaning and Significance. Mech. World-monogr. 20 — 946.
- 11) — Eastwood (L. W.) Symposium of Principles of Gating. AMF (American Foundry Society) — 1951-25.
- 12) — Lyon (R. N.) — Liquid Metal Handbook — 2.^a ed. 952.
- 13) — Halbart (G.) — Eléments d'une Théorie Mathématique de la Fonderie Carmanne-Vaillant-Liège — 945.

e muitas outras citações de Ruddle dos periódicos: AMF — Amer. Foundryman Soc. — Proceedings de várias associações, Foundry, Metal Industry, Rev. Aluminium, Ciesserei-Praxis (normas alemãs p^a fundição), Foundry Trade Journal, Journal of Inst. of Metals, Amr. Soc. of Mech. Eng., Inst. of Brit Found., etc.