

PEF 5707 – Concepção, Projeto e Realização das estruturas: aspectos históricos –
1998.3

A Evolução do Concreto Armado

Luís Fernando Kaefer

São Paulo
dezembro - 1998

1. Introdução

Este trabalho tinha por intuito inicialmente resumir a evolução do concreto armado. Entretanto, ao coletar material, verificamos que a história do concreto armado não pode ser tratada de maneira estanque. O concreto moderno, utilizado atualmente para a construção dos mais diversos tipos de estrutura é fruto do trabalho de inúmeros homens, que durante milhares de anos observaram a natureza e se esmeraram por aperfeiçoar materiais, técnicas, teorias e formas estruturais.

Desta forma, constatamos que a história do concreto armado não começou no século passado, mas com a própria civilização humana, pois a partir do momento que o homem existe sobre a terra, ele tem a necessidade básica de morar e morar melhor a cada dia, desenvolvendo novas tecnologias para isto.

Mas podemos ir mais longe que isto, a milhões de anos atrás, se considerarmos que os primeiros cimentos e concretos foram gerados pela natureza. Podemos até considerar as rochas sedimentares como concretos naturais.

Desta forma, resolvemos reestruturar este trabalho como um breve histórico sobre a arte de construir, tendo como enfoque principal a utilização do concreto. Para isto, organizamos o texto em forma de linha cronológica e coletamos fatos diversos que consideramos relevantes para a evolução da idéia de se construir com concreto.

2. Concreto, Concreto Armado e Similares

Concreto: em sua natureza básica

Material plástico, que é moldado de maneira a adquirir a forma desejada antes que desenvolva um processo de endurecimento, adquirindo resistência suficiente para resistir sozinho aos esforços que o solicitam.

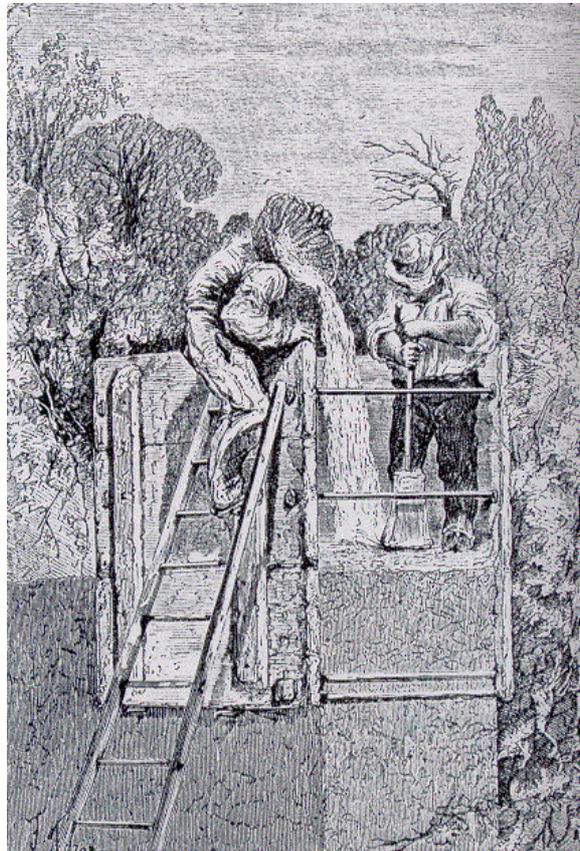


Fig. 1 – Desenho publicado em 1859 mostrando a utilização do concreto

12.000.000 a.C. – Israel

Reações entre calcário e argila xistosa durante combustão espontânea formaram um depósito natural de compostos de cimento. Estes depósitos foram caracterizados por geólogos israelenses na década de 70.

Este é o cimento natural, o primeiro cimento que os homens primeiro

utilizaram.

Cimento

Mistura finamente moída de compósitos inorgânicos que quando combinados com água endurecem por hidratação.

Origem do Homem

Os primeiros Homo Sapiens refugiaram-se nos lugares que a natureza lhes oferecia. Esses locais poderiam ser aberturas nas rochas, cavernas, grutas ao pé de montanhas ou até no alto delas. Mais tarde eles começariam a construir abrigos com as peles dos animais que caçavam ou com as fibras vegetais das árvores das imediações, que aprenderam a tecer, ou então combinando ambos os materiais.

8.000 a 4.000 a.C. – Europa

É somente no final do neolítico e início da idade do bronze que surgem as primeiras construções de pedra, principalmente entre os povos do Mediterrâneo e os da costa atlântica. No entanto, como esses monumentos colossais tinham a função de templo ou de câmaras mortuárias, não se tratando de moradias, seu advento não melhorou as condições de habitação. Pelo peso dessas pedras, acredita-se que não poderiam ter sido transportadas sem o conhecimento da alavanca.

Existem três tipos de formações megalíticas: as galerias cobertas, ou *dolmens*, espécie de corredor que possibilita o acesso a uma tumba; os *menires*, que são pedras gigantes cravadas verticalmente no solo encontrados isoladamente ou em fileiras (alinhamentos); e os *cromlech*, que são *menires* dispostos em círculo. As construções megalíticas mais famosas são as de *Stonehenge*, em *Salisbury*, na Inglaterra; as da ilha de Malta e as de *Carnac*, na França. Todos esses monumentos tem uma função ritual, já que não serviam de habitação.

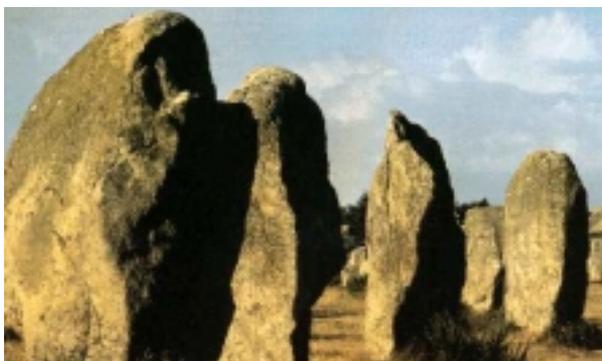


Fig. 2

Alinhamento de Menires de Carnac -
Morbihan, Bretanha, França



Fig. 3
Cromlech de Stonehenge - Wiltshire,
Inglaterra



Fig. 4
Interior de uma Habitação Neolítica - Skara
Brae, Ilhas Órcadas

Apesar de rudimentares vemos nestas edificações o desenvolvimento de estruturas aporricadas (*dolmens*), onde dois pilares de pedra apoiam uma viga também de pedra.

4.000 a.C. – Iraque

Escavações arqueológicas revelaram vestígios de uma construção de aproximadamente 4000 a.C. executada parcialmente em concreto.

3.500 a.C – Suméria

Os sumérios constituíram a civilização mais antiga do Oriente Próximo, que por volta do ano 3500 a.C. havia se estabelecido nas terras da Mesopotâmia e erigiu uma das civilizações mais esplendorosas do mundo antigo.



Fig. 5 – Mesopotâmia

A arquitetura da Mesopotâmia empregou nos seus estágios iniciais tijolos de barro cozido, maleáveis, mas pouco resistentes, o que explica o alto grau de desgaste das construções encontradas. As obras mais representativas da construção na Mesopotâmia - os zigurates ou templos em forma de torre - são da época dos primeiros povos sumérios e sua forma foi mantida sem alteração pelos assírios. Na realidade, tratava-se de edificações superpostas que formavam um tipo de pirâmide de faces escalonadas, dividida em várias câmaras.



Fig. 6
Porta de Ishtar

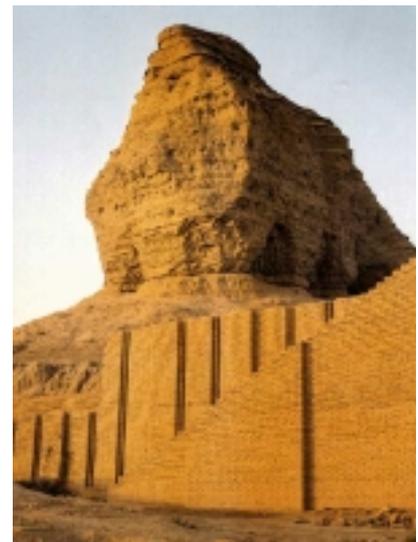


Fig. 7
Ruínas do Zigurate de Aqarqui



Fig. 8
Zigurate de Ur (Detalhe da Escadaria) - Mesopotâmia

Pela escassez de outros materiais de construção na região (pedra, madeira) os povos desta região desenvolveram a fabricação de tijolos de barro e a construção sobre solos com pouca capacidade de suporte. Estes povos já sabiam da natureza frágil dos tijolos, como podemos observar pela forma de suas construções, como por vestígios do uso de esteiras de fibras vegetais para reforçar a estrutura de zigurates, combatendo os esforços de tração que tendem a desmoronar o maciço.

A idéia de combinar materiais frágeis e dúcteis é lançada.

3.000 a.C. a 2.500 a.C. – Egito

Uso de barro misturado com palha para fabricação de tijolos (secos ao ar livre) e de argamassas de gipsita e de cal na construção das pirâmides.

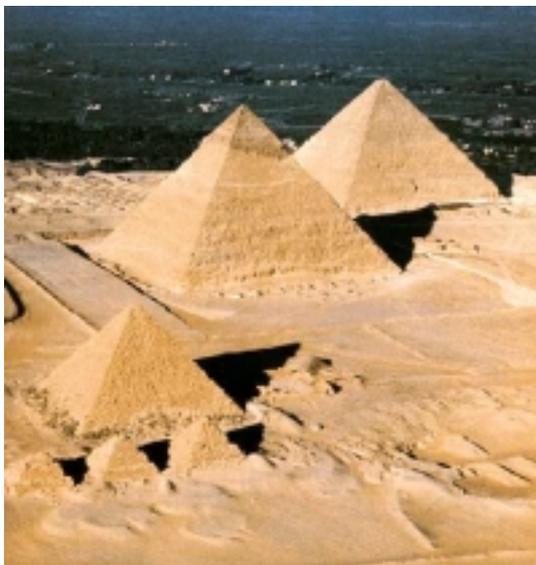


Fig. 9

Pirâmides de Gizé – Antigo Império - Gizé

Argamassa

Pasta de um aglomerante misturado a areia.

Cal

Cal é o nome genérico de um aglomerante simples, resultante da calcinação de rochas calcárias, que se apresentam sob diversas variedades, com características resultantes da natureza da matéria-prima empregada e do processamento conduzido.

A calcinação da rocha calcária pura resulta na produção de óxido de cálcio puro. Nas rochas calcárias naturais, é comum a associação do

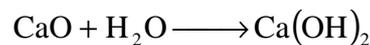
carbonato de cálcio com o carbonato de magnésio, que não constitui impureza propriamente dita, mas altera algumas propriedades da cal. A sílica, os óxidos de ferro e de alumínio são as impurezas que acompanham os carbonatos, em maior ou menor grau, na constituição das rochas calcárias. Observa-se que na fabricação da cal estas impurezas podem alterar bastante as propriedades da cal produzida.

Reação de Calcinação



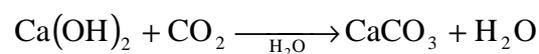
A cal viva não é ainda o aglomerante utilizado em construção. O óxido deve ser hidratado, transformando-se em hidróxido, que é o constituinte básico do aglomerante cal. A operação de hidratação recebe o nome de extinção (reação fortemente exotérmica), e o hidróxido resultante denomina-se cal extinta.

Extinção da Cal Viva



A cal extinta é utilizada em mistura com água e areia, em proporções apropriadas na elaboração de argamassas. Estas têm consistência mais ou menos plástica, e endurecem por recombinação do hidróxido com o gás carbônico presente na atmosfera, reconstituindo o carbonato original, cujos cristais ligam-se de maneira permanente aos grãos de agregado utilizado. Esse endurecimento se processa com lentidão e ocorre, evidentemente de fora para dentro, exigindo uma certa porosidade que permita, de um lado, a evaporação da água em excesso e, de outro, a penetração do gás carbônico do ar atmosférico. Devido a este processo, este aglomerante é chamado freqüentemente de cal aérea. A cal não endurece debaixo da água e depois de endurecida dissolve-se lentamente debaixo da água.

Endurecimento da cal



A calcinação do calcário pode ser realizada em instalações rudimentares, de forma similar à qual os nossos antepassados a fabricavam dispondo camadas de calcário e carvão vegetal ou através de fornos modernos, de produção ininterrupta e de alto padrão de qualidade como os fornos rotativos.

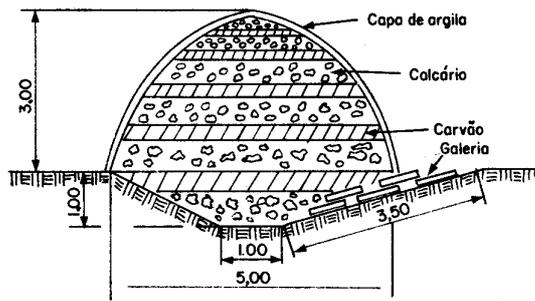


Fig. 10 – Forno de campanha para cal

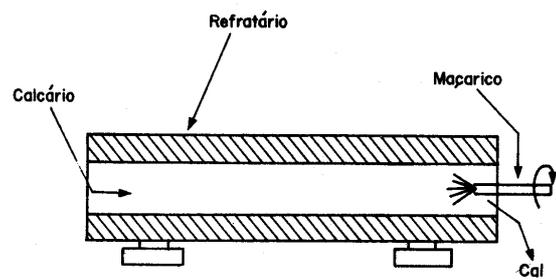


Fig. 11 – Forno contínuo horizontal para cal

Gipsita

É constituída por sulfato bi-hidratado de cálcio ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) geralmente acompanhado de uma certa proporção de impurezas, como sílica, alumina, óxido de ferro, carbonatos de cálcio e magnésio. Da sua calcinação obtém-se o gesso, um aglomerante que endurece por hidratação, mas que se dissolve lentamente na água, inclusive pela ação da chuva. O gesso é obtido por processo semelhante ao empregado na fabricação da cal

800 a.C. – Grécia: Creta e Cyprus

Uso de argamassas de cal mais resistentes que as argamassas romanas.

Construção de muros e paredes de baixo custo compostas por tijolos de barro (secos ao sol) ou pedras, assentados diretamente uns sobre os outros ou com argila e reforçados com madeira apareceram cedo na Grécia e foram comuns mesmo na era clássica para edificações modestas.

Nas construções monumentais gregas, ao invés de argamassa, grampos ou tarugos de ferro foram geralmente usados para manter juntos os blocos de pedra.

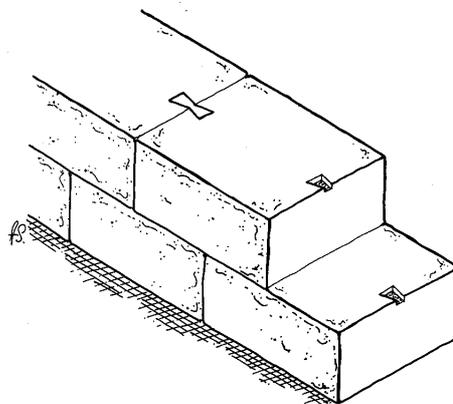


Fig. 12 – Grampos usados em construções gregas

500 a.C. – Atenas

Apesar de o cimento e a argamassa não terem sido usados na Grécia, tanto para a construção de paredes ou fundações, o cimento hidráulico já era conhecido desde o começo do século V a.C. e foi comumente utilizado para revestir fontes atenienses deste período.

437 a.C. – Atenas

Uma surpreendente técnica usando ferro para aumentar a confiabilidade das peças estruturais de pedra é encontrada no *Propylaea* em Atenas, construído entre 437 e 432 a.C. pelo arquiteto *Mnesikles*. A cobertura de mármore é suportada por uma série de vigas que se apoiam sobre arquitraves jônicas. As vigas que coincidem com colunas que sustentam as arquitraves, transmitem seu carregamento diretamente aos pilares, por compressão. Entretanto, as vigas posicionadas na metade do vão das arquitraves produzem uma flexão significativa e originam consequentemente esforços de tração nas arquitraves. Para reduzir esta flexão, transferindo a carga do meio do vão para um ponto mais próximo das colunas, barras de ferro foram embutidas na face superior das arquitraves, deixando-se abaixo delas uma fenda com 2,5cm de altura para permitir a deflexão das barras de ferro sem que estas entrem em contato com as arquitraves. Em efeito, as barras de ferro agem como vigas independentes de alívio.

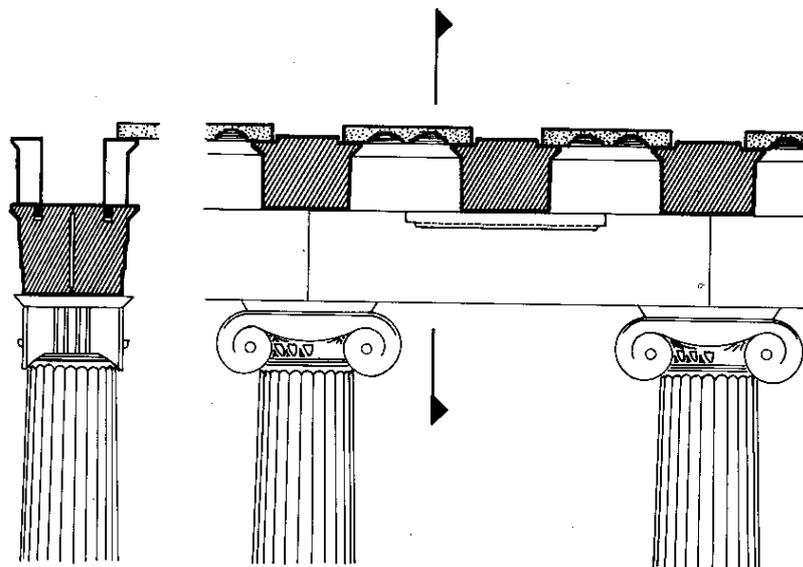


Fig. 13 – Propylaea, Atenas – Barra de ferro inserida na viga sobre os pilares

Estas barras de ferro não podem ser interpretadas como pertencendo a uma forma similar à armadura utilizada no moderno concreto armado, entretanto podemos considerar outra forma incipiente de se associar um material dúctil a um material frágil, de modo a permitir o uso do material frágil sob tração.

Cal Pozolânica

Os romanos descobriram que, misturando uma cinza vulcânica encontrada nas proximidades do Vesúvio chamada pozolana com cal hidratada (que entra em proporção variável, de 25 a 45%), obtinham um aglomerante que endurecia sob a água. Esse material, atualmente encontra-se em desuso.

Sua reação de endurecimento se dá por processo químico e produz um material resistente sob a água.

Cal Hidráulica

O nome cal hidráulica é aplicado a uma família de aglomerante de composição variada, obtidos pela calcinação de rochas calcárias que, natural ou artificialmente, contenham uma porção apreciável de materiais argilosos. O produto goza da propriedade de endurecer sob a água, embora, pela quantidade de hidróxido de cálcio que contém, sofra também ação de endurecimento pela carbonatação proveniente da fixação de CO₂ do ar.

A cal hidráulica é fabricada por processos semelhante ao da fabricação da cal comum. A matéria-prima é calcinada em fornos e o produto obtido subsequente extinto.

Apesar de endurecer sob a água (reação de hidratação) e resistir quando imerso, não é um produto apropriado para construções sob a água, pois sua pega é muito lenta.

300 a.C. a 476 d.C – Império Romano

O concreto foi usado na construção dos muros de uma cidade romana no século IV a.C. situada a 64km de Roma e no século II a.C. este novo material começou a ser usado em edificações em Roma.

A pozolana de *Pozzuoli*, Itália, localidade próxima ao Monte Vesúvio foi utilizada em argamassas utilizadas para construir a Via Ápia, os banhos romanos, o Coliseu e o *Pantheon* em Roma e aquedutos, como *Pont du Gard* no sul da França. Os romanos usaram a cal como material cimentício. Plínio relata uma argamassa com proporção 1:4 de cal e areia. *Vitruvius* reporta uma argamassa com proporção 1:2 de cal e pozolana. Gordura animal, leite e sangue foram usados como aditivos para incorporar ar à mistura.

Arquitetura romana, começando no último período republicano, diferenciou-se dos precedentes gregos pelo uso de novos materiais e novas formas. Tijolos (cozidos) e concreto foram utilizados na criação de edifícios públicos com espaçosos, abobadados interiores. Para dar sustentamento a estes experimentos arquitetônicos, construtores romanos similarmente introduziram novas soluções técnicas.

A mais importante inovação nas fundações romanas foram as plataformas de concreto. A capacidade hidráulica do cimento pozolânico (ou mais corretamente cal pozolânica) utilizado pelos romanos permitiu que as fundações pudessem ser

lançadas mesmo sob a água, como por exemplo em *Ostia*, a cidade portuária de Roma.

Roma se situa sobre uma região onde predominam solos arenosos de origem vulcânica. Deste fato resultou a necessidade de que as valas abertas para a construção das edificações fossem revestidas com madeira para evitar desmoronamentos e prover uma fôrma para o concreto.

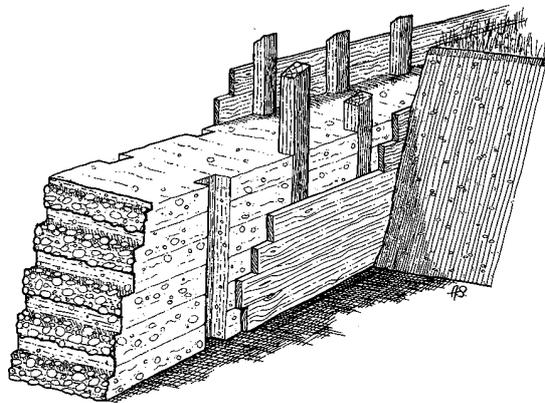


Fig. 14 – Detalhe de fôrma de madeira utilizada em construções romanas

Estes solos possuem pouca capacidade de suporte. A solução adotada para distribuir as enormes cargas dos edifícios públicos, evitando recalques diferenciais e reduzir a pressão aplicada sobre o solo foi a adoção de espessos *radiers*, sob toda a estrutura.

Além disso, como o peso da fundação é grande quando comparado com o da superestrutura, muitos dos problemas resultantes do adensamento do solo podem ser corrigidos antes de que uma significativa porção da superestrutura tenha sido construída.

Apesar de caros, os *radiers* foram uma solução tecnicamente muito adequada utilizada pelos romanos.

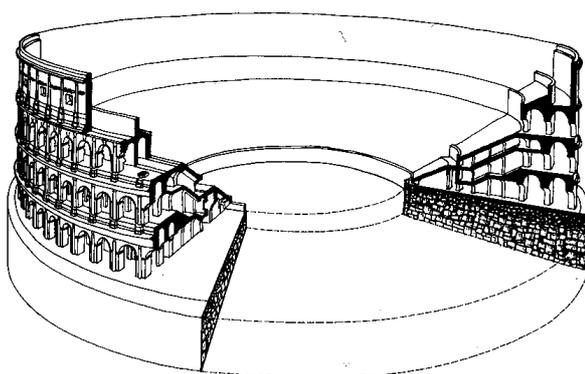


Fig. 15 – Coliseu (80 d.C.) superestrutura e fundações

A fundação do Coliseu consiste de um anel com 12m de profundidade, construído com concreto ciclópico. Similarmente, o *Pantheon* se assenta sobre um anel de concreto com 4,5m de profundidade e 7m de largura.

No norte da Europa, aonde densos siltes e argilas prevalecem, as fundações romanas sofreram alterações. Valas eram cavadas de maneira a acomodar fundações lineares construídas em pedra e concreto. Características destas regiões são os espessos muros construídos nos últimos anos do Império. Muitos deles são

construídos em largas e profundas fundações construídas com grandes blocos de pedra de cantaria retiradas de monumentos sacrificados para as campanhas defensivas.

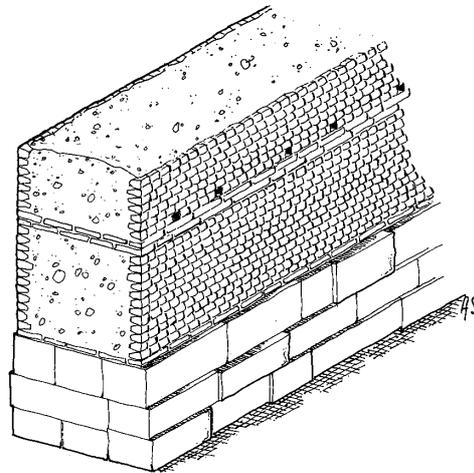


Fig. 16 – Fundação romana de um muro em Beauvais (séc. IV d.C.)

Na construção de muros, o concreto romano era em alguns aspectos simplesmente argamassa, utilizada para assentar tijolos nas faces externas dos muros e preencher os vazios entre pedaços de pedra ou tijolos quebrados que eram colocados no espaço entre as faces de alvenaria.

Diferentemente da prática moderna, que emprega fôrmas metálicas ou de madeira temporárias para suportar o concreto fresco até que ele endureça, os romanos freqüentemente empregaram na construção de seus muros e pilares fôrmas de pedras ou tijolos, classificadas de acordo com o padrão do revestimento usado. Os três principais tipos foram *opus incertum*, um revestimento irregular de pequenos paralelepípedos, *opus reticulatum*, pedras quadradas assentadas diagonalmente e *opus testaceum*, revestimento de tijolos.

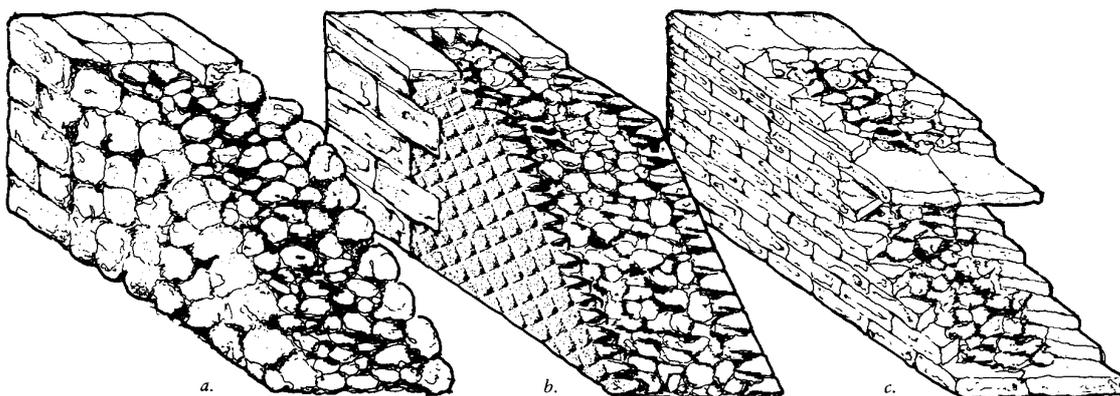


Fig. 17 – Revestimentos Romanos (a) *Opus Incertum* (b) *Opus Reticulatum* (c) *Opus testaceum*

Mas na construção de abóbadas, que se tornaram dominantes na arquitetura romana, concreto era claramente usado de acordo com sua própria natureza, um

material plástico que podia ser moldado até que desenvolvesse resistência suficiente para se manter de pé sozinho. Uma vez que as paredes de alvenaria alcançavam a altura necessária, escoramentos de madeira para a construção das cúpulas eram erigidas. A escassez de madeira em grande parte do Império Romano demandava economia na preparação das fôrmas, sendo o reaproveitamento de fôrmas e escoramento prática comum. Pisos alternados de edifícios eram freqüentemente suportados por cúpulas de concreto enquanto os pisos entre eles eram construídos em madeira. Foi a técnica de se construir com concreto que constituiu a base para a ordem espacial encontrada na arquitetura romana.

A expressão máxima do desenvolvimento da cúpula durante o Império Romano é encontrada no *Pantheon* de Roma, construído entre 118 e 128. Sua cúpula de 43m de diâmetro apoia-se num cilindro composto por um núcleo concreto pozolânico revestido com tijolos e mármore com 6m de espessura nas nervuras.



Fig. 18– *Pantheon* de Roma– Interior

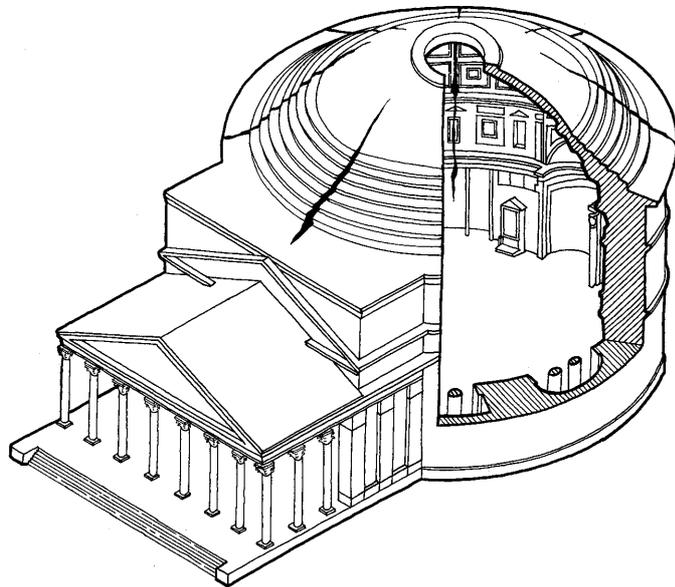


Fig. 19 – *Pantheon*

O principal uso dos arcos se deu na construção de aquedutos, pontes e como estruturas de alívio, desviando a carga de aberturas nas paredes de alvenaria.



Fig. 20 – Aqueduto romano em *Pont du Gard*, Nîmes, I d.C

As cidades e fortificações do vasto Império Romano eram ligadas por um notável sistema de estradas, muitas das quais resistem até hoje. O leito das estradas romanas representa uma obra de mestre em termos de dimensionamento de fundações, sobrepondo camadas de resistência crescente a uma camada drenante de areia. O pavimento era escolhido conforme o tráfego da estrada, podendo ser de concreto ou paralelepípedos.

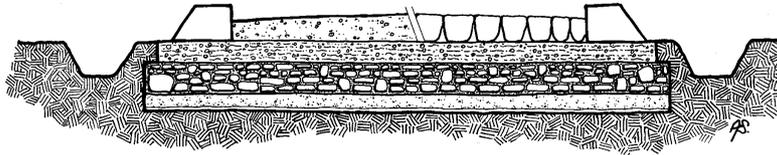


Fig. 21 – Estrada romana: Corte transversal

A idéia de associar barras metálicas à pedra ou argamassa com a finalidade de aumentar a resistência às solicitações de serviço remonta ao tempo dos romanos. Durante a recuperação das ruínas das termas de Caracalla em Roma, notou-se a existência de barras de bronze dentro da argamassa de pozolana, em pontos onde o vão a vencer era maior do que o normal na época.

Idade Média

Arquitetos medievais utilizaram pedras na maioria de suas construções. Para a fundação, construtores góticos usualmente preenchiam uma vala com pedregulhos e os compactavam para servir de base para a alvenaria, mas em alguns edifícios mais importantes, uma fundação melhor era feita com um resistente concreto constituído por pedregulhos e argamassa de cal. Muros inteiros eram feitos com pedras assentadas com argamassa, mas freqüentemente as faces exteriores eram cuidadosamente confeccionadas com pedras de cantaria, utilizando argamassa e pedregulhos para preencher o interior do muro, similarmente como os romanos faziam.

A Idade Média não trouxe inovações expressivas no emprego de argamassas e concretos. Pelo contrário, a qualidade dos materiais cimentíceos em geral decaiu, perdendo-se o uso da cal pozolânica (adição). Há evidências de que no vale do Rio Reno, *tarras*, uma rocha vulcânica era adicionada à mistura. Pó de tijolos de barro também foram utilizados para aumentar a resistência das argamassas. Inovações expressivas só começam a ocorrer no século XVIII no tocante ao uso de cimentos e argamassas.

1586 – Simon Stevinus, Holanda

Os fundamentos da estática gráfica são publicados por Simon Stevinus em seu livro *Mathematicorum Hipomnemata de Statica*.

1678 – Robert Hooke, Inglaterra

Hooke estabelece os fundamentos da elasticidade através de seus experimentos com molas.

1678 – Joseph Moxon, Inglaterra

Joseph Moxon descreve a natureza exotérmica da reação de hidratação da cal virgem, escrevendo sobre um "fogo escondido" na cal, que aparece com a adição de água à cal virgem.

Muito dos estudos iniciais do cimento foram dirigidos para melhorar as argamassas, particularmente as utilizadas na construção de estruturas portuárias no século XIX, visando melhorar sua estabilidade sob a água. Entretanto, logo reconheceu-se a vantagem de se utilizar o cimento como concreto.

1756 a 1793 – Reconstrução do Farol de Eddystone, Inglaterra

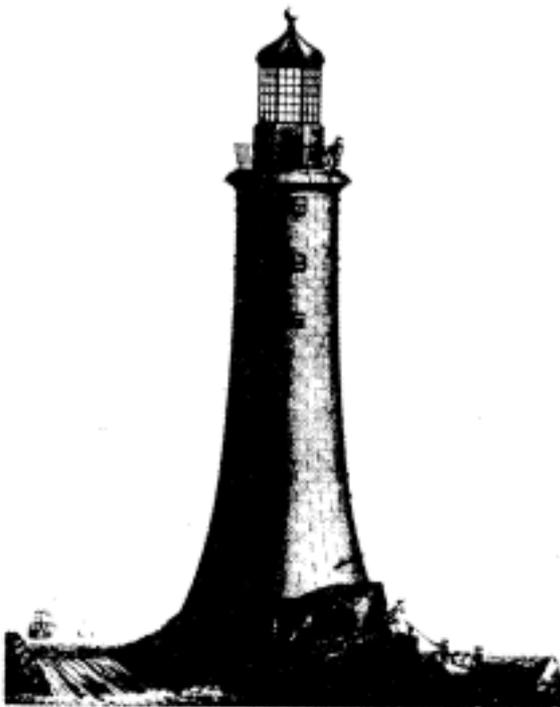


Fig. 22– Farol de Eddystone

O Farol de *Eddystone* se situava em *Cornwall*, 9km ao sudoeste do Porto de *Plymouth*, um dos portos ingleses mais movimentados da época.

Após a terceira versão do farol ter sido queimada numa noite de dezembro de 1755, John Smeaton foi escolhido para dirigir sua reconstrução.

Sob a maré alta, a rocha aonde o Farol de *Eddystone* deveria ser reconstruído era coberta pelo mar, o que constituía um ambiente bastante agressivo. Ciente deste fato, Smeaton sabia que a escolha da argamassa a ser utilizada seria decisiva para o sucesso da construção e para a durabilidade do farol. Por isso, ele empreendeu uma série de experimentos de modo a obter uma cal que possuísse propriedades hidráulicas (endurecesse e resistisse sob a água) e que também fosse econômica.

Smeaton iniciou uma série de experimentos para determinar o cimento que poderia ser utilizado, chegando a várias conclusões. Primeiro ele descobriu que o uso de cal produzida a partir de "uma queima imperfeita" do calcário era inútil, ou

seja, de que a cal comum não resistia sob a água. Segundo, ele descobriu que a dureza da rocha a partir da qual a cal era produzida não influía na dureza da argamassa produzida a partir de testes com uma grande variedade de rochas calcárias que poderiam fornecer matéria-prima para a produção de cal.

Testes foram feitos com argamassas contendo pedra pomes, cinzas volantes, resíduos de tijolos e escória de forjas de ferreiros e várias outras substâncias que algumas vezes tenham sido utilizadas para conferir propriedades hidráulicas à argamassa. As substâncias que provaram ser mais eficientes foram a pozolana e uma rocha vulcânica chamada *tarras*. Depois de testar diferentes misturas dos ingredientes da argamassa, Smeaton estimou seu custo por volume. A adição de *Tarras* foi então escolhida com base em seu custo.

Entretanto o destino mudou a escolha de Smeaton. Uma grande quantidade de pozolana havia sido importada da Itália por um mercador de *Plymouth* que intencionava comercializá-la a um alto preço para a construção da Ponte de *Westminster*. Entretanto, tendo a especulação do mercador falhado, ele comercializou esta pozolana para a construção do Farol de *Eddystone* a um preço mais baixo que o orçado para *tarras*.

Em suas experiências Smeaton descobriu que o cimento hidráulico dependia de uma considerável quantidade de argila existente na rocha calcária (e que portanto era queimada junto com a cal), embora argila adicionada posteriormente à cal não resultasse em qualidades hidráulicas. Sem conhecimento algum da complexa química dos cimentos, Smeaton havia determinado as características fundamentais do cimento hidráulico natural a partir de um dos primeiros estudos exaustivos de um material de construção.

O tempo mostrou que as investigações de Smeaton resultaram em um aglomerante de excelente qualidade, pois sua versão do farol durou mais de um século.

1757 – Leonhard Euler

O matemático suíço Euler publica um trabalho estabelecendo uma fórmula para determinação da máxima carga que podia ser aplicada a uma coluna antes dela flambar.

1770 – Pantheon de Paris

A associação do ferro com a pedra natural modernamente aparece pela primeira vez na estrutura da Igreja de Santa Genoveva, hoje *Pantheon*, em Paris, 1770). Segundo seu arquiteto, Jacques Germain Soufflot, a intenção era de reunir nesta obra a leveza do gótico com a pureza da arquitetura grega. Existindo poucas colunas na fachada, era necessário executar grandes vigas capazes de efetuar a transferência das elevadas cargas da superestrutura para as fundações. Com o senso admirável de Rondelet foram executadas em pedra lavrada, verdadeiras vigas modernas de concreto armado, com barras longitudinais retas na zona de tração e barras transversais de cisalhamento. As barras longitudinais eram enfiadas em furos executados artesanalmente nas pedras e os espaços vazios eram preenchidos com uma argamassa de cal.

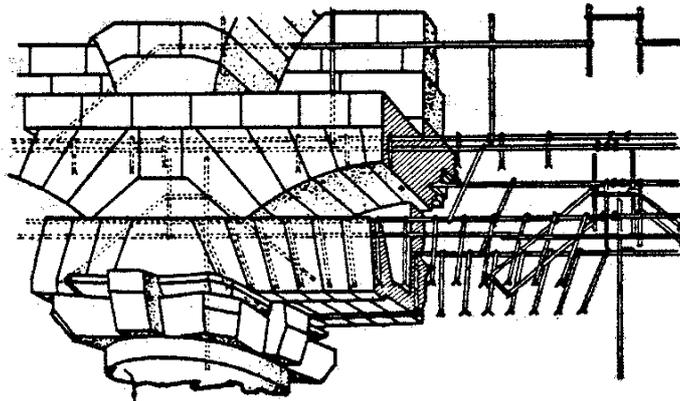


Fig. 23 – Alvenaria de pedra armada, *Pantheon* de Paris

Analisando a figura acima percebemos que já havia um grande entendimento do caminhamento das cargas na estrutura e da natureza destes esforços, combinando-se ferro e pedra para resistir os esforços. Faltava apenas um meio mais fácil e barato de empregar esta idéia largamente, que viria com a invenção do cimento. O cimento que permitiu inverter-se o processo de fabricação, executando-se primeiro a armação.

1775 – França

Reorganização do currículo de engenharia da Ecole des Ponts et Chaussées em Paris.

1775 – Charles Augustin Coulomb, França

Coulomb, um físico e engenheiro militar francês, estabelece os fundamentos da teoria de vigas: a linha neutra de uma seção retangular homogênea se situa na metade da sua altura, a resultante das forças de tração atuantes de um lado do eixo neutro é igual à resultante de compressão do outro lado e a resistência dos esforços internos da viga deve equilibrar o momento introduzido pelas cargas externas.

1779 – *Stucco* de Bryan Higgins, Inglaterra

Por alguma razão, as investigações de Smeaton não chegaram Bryan Higgins, um físico irlandês, que lecionava em uma escola de química em Londres. Após uma série de cuidadosos estudos laboratoriais ele patenteou uma forma de *stucco* (espécie de cimento hidráulico) contendo cal, areia e cinzas de ossos que ele havia utilizado no reboco externo de várias casas. Entretanto o *stucco* de Higgins não resistia bem à ação do clima e desapareceu com a competição do cimento romano de James Parker.

1780 – Bryan Higgins, Inglaterra

Bryan Higgins publica "Experimentos e Observações Realizados com o Intuito de Melhorar a Arte de Compor e Aplicar Cimentos Calcários e Preparar Argamassas".

1796 – Cimento Romano de James Parker, Inglaterra

James Parker patenteia um cimento hidráulico natural, obtido da calcinação de nódulos de calcário impuro contendo argila. Este cimento é chamado Cimento de Parker ou Romano.

Este material, primeiramente conhecido como cimento de Parker e depois como cimento romano era feito a partir de "nódulos" encontrados em vários lugares na Inglaterra. Conhecidos localmente como pedras de cimento e tecnicamente como *septaria*, estas pedras de forma arredondada continham veios e um núcleo de material argiloso. Para produzir cimento romano, estes nódulos eram despedaçados por meninos munidos de marretas e carregados para fornos em forma de garrafa com capacidade para até 30t, aonde carvão necessário para queimá-los era adicionado. Após três dias, a rocha que já havia sido suficientemente queimada podia ser retirada por uma abertura na parte de baixo do forno e mais rocha e carvão eram adicionados no topo do forno. A rocha calcinada era então moída e peneirada antes de ser acondicionada em barris para expedição.

Pouco tempo depois de Parker receber sua patente, os diretores da "*British Society for Extending the Fisheries and Improving the Sea Coasts of This Kingdom*" autorizou que o seu produto fosse testado por um engenheiro desta sociedade, Thomas Telford, que possuía considerável experiência na construção de canais e estruturas portuárias. O relatório de Telford foi tão favorável que Parker rapidamente publicou-o em panfletos promocionais. Por alguma razão, após dois anos, Parker vende sua patente a Samuel Wyatt e seu sobrinho Charles Wyatt. A fábrica de Wyatt prosperou até pelo menos 1810, quando a patente de Parker expirou. Sucessivos membros da família Wyatt herdaram a direção da companhia e o desenvolvimento de outros produtos após 1810 sugere que as vendas do cimento romano de Parker declinaram em face à competição que havia se materializado.

1802 – França

Uso de um processo de fabricação de cimento romano similar ao de Parker.

1810 – Edgar Dobbs, Inglaterra.

Edgar Dobbs recebe uma patente para argamassas hidráulicas, *stucco* e reboco, embora este material possuía baixa qualidade em virtude à falta de precauções com o forno de calcinação.

1818 – Louis Joseph Vicat, França

Desde os experimentos de Smeaton pouco havia sido feito para o desenvolvimento de uma teoria que explicasse o comportamento e as propriedades físicas do cimento até que Vicat publica *Recherches expérimentales sur les chaux de construction, le béton et les mortiers*, que reúne seus estudos e conclusões sobre seus ensaios realizados sobre cimentos.

Nesta época ele estava dirigindo a construção de uma ponte sobre o Rio *Dordogne*, o primeiro grande projeto em que as fundações de concreto foram feitas sem o uso de pozolana, o que o levou a investigar as propriedades do cimento.

Vicat investigou os fatores que poderiam resultar em uma argamassa capaz de endurecer abaixo da água. Misturando cal, gesso e argilas de diferentes tipos e em diferentes proporções, Vicat preparou pequenos blocos dos materiais testados. De maneira bastante simples, ele concluiu que "não há argamassa hidráulica perfeita sem sílica e que toda cal que pode ser denominada hidráulica contém certa quantidade de argila. Onde Smeaton procurou pelo mais vantajoso material natural para a produção de cimento hidráulico, a conclusão de Vicat implicava que a chave estava no planejamento das misturas, que poderiam resultar em tipos de cimento muito mais resistentes que os naturalmente encontrados.

Vicat desenvolveu um método que é utilizado até hoje para determinar o tempo de pega e de endurecimento do cimento, baseado na penetração de uma agulha numa amostra de pasta de cimento fresco.

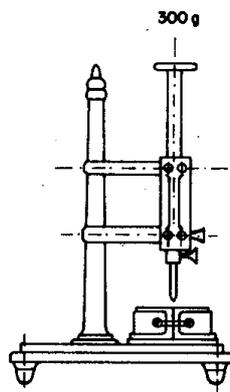


Fig. 24 – Aparelho de Vicat

1820 – Canvass White, Estados Unidos

Canvass White obtém a primeira patente de um cimento hidráulico natural nos Estados Unidos, a partir de testes realizados sobre rochas calcárias utilizadas para produzir cal para a construção do *Erie Canal* (conectando *Lake Erie* e o Atlântico via o Rio Hudson).

A patente de White foi subsequentemente comprada pelo Estado de Nova Iorque, resultando na retirada de todas as restrições de fabricação deste cimento.

1824 – Cimento Portland de Joseph Aspdin, Inglaterra

Joseph Aspdin inventa o cimento Portland, queimando calcário e argila finamente moídos e misturados a altas temperaturas até que o gás carbônico (CO₂) fosse retirado. O material obtido era então moído. Aspdin denomina este cimento como cimento Portland em menção às jazidas de excelente pedra para construção existentes em Portland, Inglaterra.

A definição moderna de cimento Portland não poderia ser aplicável ao produto que Aspdin patenteou. O cimento Portland hoje em dia é "feito a partir da queima a altas temperaturas – até a fusão incipiente do material – de uma mistura definida de rocha calcária e argila finamente moídas resultando no clínquer. É duvidoso que o cimento produzido sob a patente de Aspdin de 1824 tenha sido queimado a uma temperatura suficiente para produzir clínquer e além disso, sua patente não define as proporções dos ingredientes empregados. Desta forma, Aspdin não produziu cimento portland como conhecemos atualmente.

Em 1825 Aspdin estabeleceu uma fábrica de cimento em um subúrbio de *Leeds*. Os fornos utilizados para queimar o material cru foram construídos em alvenaria com a forma de uma garrafa, com aproximadamente 12m de altura e 5,6m de diâmetro próximo à base. Entretanto, estes fornos eram bastante precários, pois havia um grande desperdício de combustível (cada fornada necessitava que a massa inteira de tijolos fosse reaquecida e certas velocidades e direção do vento podiam resultar num consumo de coque acima da metade do peso de clínquer produzido) e uma grande percentagem do produto era queimado imperfeitamente, o que requeria um tedioso e custoso trabalho de inspeção e classificação manual.

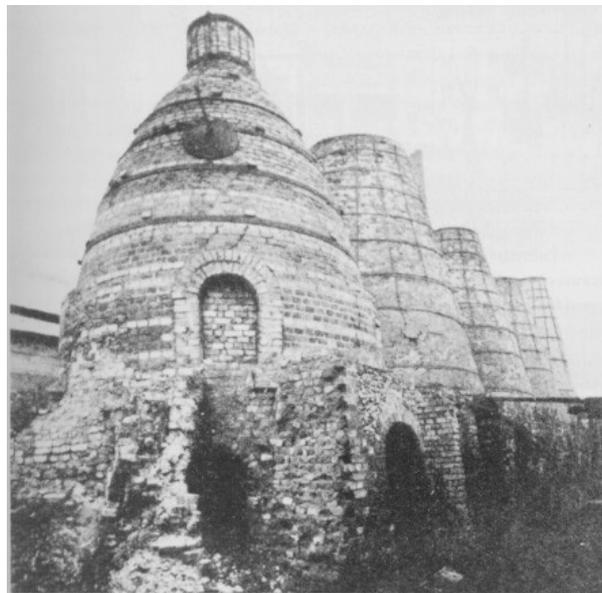


Fig. 25 – Forno em forma de garrafa para produção de cimento Portland

1828 – Inglaterra

I. K. Brunel é creditada a primeira aplicação de cimento Portland, que foi utilizado para preencher uma fenda no Túnel do Tâmis.

1836 – Alemanha

Têm início os primeiros ensaios sistemáticos para determinação da resistência a tração e compressão do cimento.

1836 – George Godwin, Inglaterra

Uso do concreto é descrito por um artigo de George Godwin para o *Institute of British Architects*. Segundo ele, para fundações uma mistura de cal, água e pedras podia ser utilizada, colocando-se numa trincheira camadas alternadas de pedra e argamassa, compactando-se a mistura após o lançamento da argamassa. É interessante notar que hoje em dia são utilizados métodos parecidos a este para a construção de pavimentos flexíveis. Godwin descreve também que a cal e as pedras podiam ser lançadas secas em uma escavação coberta por água.

Observa-se na década de 1830 um desenvolvimento incipiente do uso do concreto, principalmente em fundações, estabelecendo-se o termo *concreto* para uma massa sólida em que cimento, areia, água e pedras são combinadas.

1845 – Isaac Johnson, Inglaterra

Isaac Charles Johnson, da *J.B. White and Sons* afirma ter queimado argila e calcário a uma temperatura suficiente a produzir clínquer.

1847/1848 – Controvérsias sobre o Cimento, Inglaterra

Na década de 1840, controvérsias sobre a resistência dos cimentos produzidos na região de Londres levaram a um grande desenvolvimento do cimento. *J.B. White and Sons* e a *Aspdin and Company* tiveram amostras de seus cimentos testados em prensas hidráulicas de 75t em 1847 e 1848. Os resultados obtidos foram bastante semelhantes a ensaios parecidos conduzidos em 1862 com amostras de um cimento reconhecidamente Portland (em sua concepção moderna), o que nos leva a crer que desde 1848, cimento Portland tenha sido produzido por ambas as companhias ou talvez pelas quatro empresas existentes na Inglaterra.

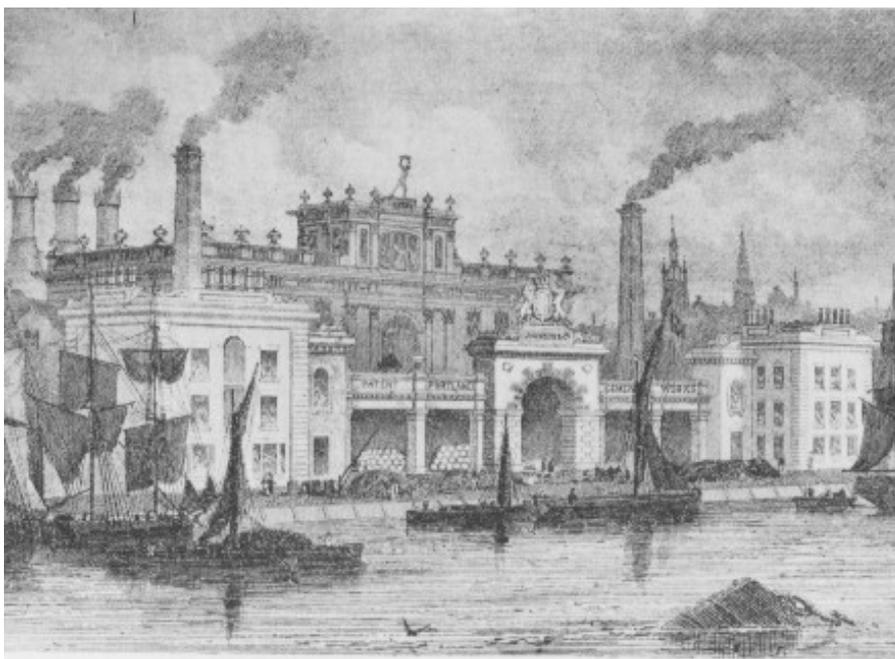


Fig. 26 – Instalações da *Aspdin, Ord and Company* em *Newcastle*, Inglaterra.

1850 a 1900 – Alemanha

Na segunda metade do século XIX, a Alemanha foi o principal centro de desenvolvimento de métodos e testes para o cimento.

A melhoria da qualidade do cimento decorreu principalmente a avanços no projeto dos fornos que aumentaram a uniformidade do clínquer e da introdução em 1871 de análises químicas sistemáticas de toda matéria-prima utilizada. Uma maior proporção de calcário e fornos capazes de suportar temperaturas mais altas resultaram num clínquer mais duro. Em 1875 foi reconhecido que os maiores grãos do clínquer moído faziam pouco pela resistência do cimento e em dois anos somente 3 a 4% das partículas do cimento alemão eram retidas na peneira nº 6000 (6000 furos por polegada quadrada). Todas estas melhorias técnicas foram assistidas pelo governo alemão, seus laboratórios e instalações das Universidades Técnicas.

1850– B. P. E. Clapeyron, França

Clapeyron, um engenheiro francês começa a utiliza um novo método para resolver o problema de vigas contínuas, o "Teorema dos Três Momentos".

1850 a 1855 – Joseph Louis Lambot, França

A primeira publicação sobre Cimento Armado (denominação do concreto armado até mais ou menos 1920) foi do francês Joseph Louis Lambot. Presume-se que em 1850 Lambot efetuou as primeiras experiências práticas do efeito da introdução de ferragens numa massa de concreto. Em 1854, Lambot já executava construções de "cimento armado" com diversas finalidades.

Imerso em estudos sobre o concreto armado e motivado por problemas com a manutenção de canoas de madeira utilizadas para lazer em um pequeno lago existente em sua propriedade em Miraval, no Var sul da França Lambot tem a idéia de construir um barco de concreto. Nada mais lógico, pois o concreto é durável, requer pouca manutenção e resistente bem em meios aquáticos. Lambot empregou para a construção de sua canoa uma malha fina de barras finas de ferro (ou arame), entrelaçadas, entremeadas com barras mais grossas, usando essa malha fina ao mesmo tempo como gabarito para se obter o formato adequado do barco , para segurar a argamassa, dispensando a confecção de moldes e para evitar problemas com fissuras.

Em 1855 Lambot expõe seu barco na Exposição Mundial de Paris e solicita a patente de seu projeto. No documento representativo do pedido de patente existe além da placa que corresponde à armação do barco também o desenho de algo parecido com um pilar de seção retangular com quatro barras longitudinais de ferro.

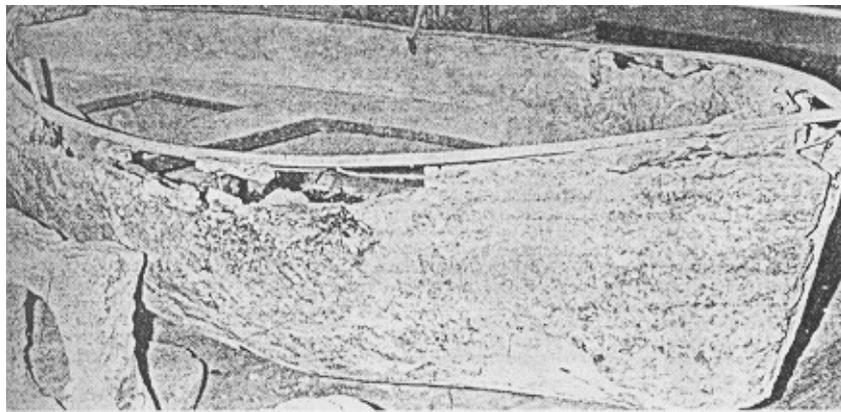


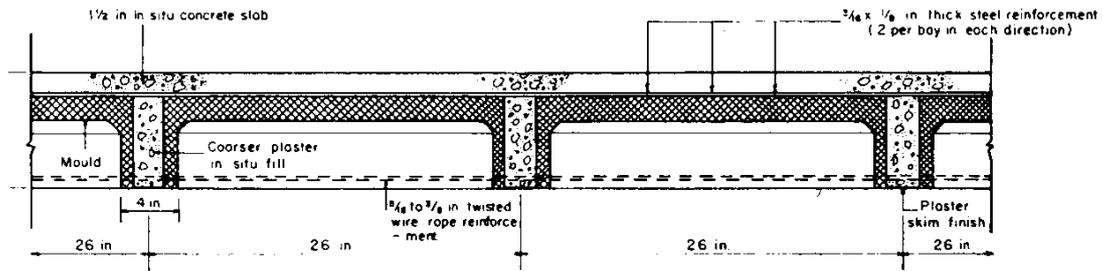
Fig. 27 – Remanescente de uma das canoas de Lambot

O barco exposto media aproximadamente 4m de comprimento por 1,30m de largura com paredes de aproximadamente 4cm de espessura.

Apesar de ser considerado por muitos como o pai do concreto armado, os experimentos de Lambot não tiveram muita repercussão por si só, mas segundo alguns autores, serviu de inspiração para Joseph Monier difundir sua utilização.

1854 – William Boutland Wilkinson, Inglaterra

Em 1854, um fabricante de gesso de paris e cimento romano chamado Wilkinson obtém a patente de um sistema de lajes nervuradas que demonstra o domínio dos princípios básicos de funcionamento do concreto armado ao dispor barras (ou cabos) de aço nas regiões tracionadas das vigas ou viguetas.



DETAILS OF HOLLOW PLASTER BLOCK FLOOR

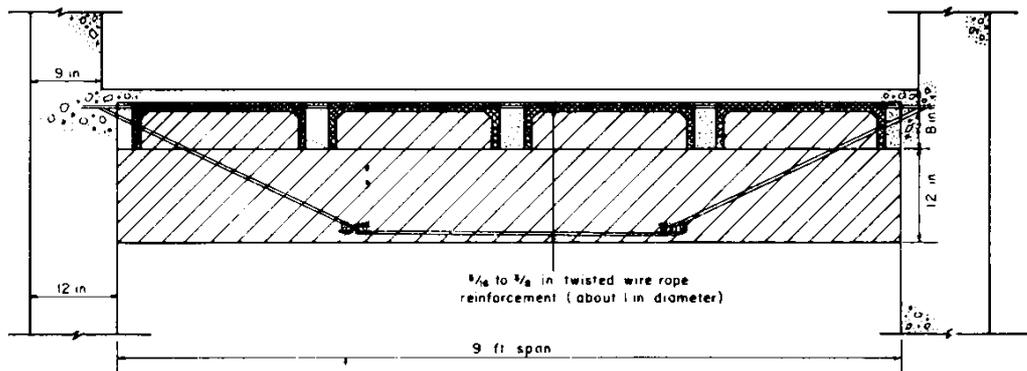


Fig. 28 – Desenho moderno do sistema de piso de Wilkinson executado 11 anos após a sua patente.

Wilkinson percebeu que a rigidez da laje pode ser aumentada através da inserção de vazios (através de moldes) regularmente espaçados e separados por nervuras, aonde cabos de aço eram colocados na sua porção inferior no meio do vão e subiam para a parte superior da viga nas proximidades dos apoios. A laje possuía um vão de aproximadamente 4m em cada direção e uma malha de barras de aço era colocada na parte inferior da camada de concreto de 4cm de espessura que cobria as nervuras. Em uma viga maior (na mesma fig. 27) , observam-se as mesmas disposições utilizadas nas nervuras da laje.

1855 – Alemanha

Início da fabricação do cimento Portland na Alemanha.

1860

Começo da era do cimento Portland em sua composição moderna.

1862 – *Blake Stonebreaker*, Inglaterra

A *Blake Stonebreaker* introduz o triturador de mandíbulas para triturar o clínquer.

1867 – Joseph Monier, França

Devido à similaridade entre o método utilizado por Monier para construir seus vasos de concreto armado e por Lambot para a armação de sua canoa de concreto levam a crer que o primeiro sofreu influência do segundo. Entretanto, existem divergências quanto a este fato.

O mais certo é que Monier, um jardineiro, que fabricava vasos e tubos de concreto desde 1849 considerando seus vasos muito frágeis começa a mergulhar na massa de concreto uma malha de aço. Em 1867 Monier havia avançado tanto em seu método ao ponto de patenteá-lo, e exibi-lo na Exposição de Paris daquele ano.

A primeira extensão de sua patente parece ter sido para a construção de reservatórios de água. Entre 1868 e 1873 executou primeiro um reservatório de 25m³ e mais tarde outros dois com 180m³ e 200m³ (suportado por colunas).

Monier é considerado um dos grandes disseminadores da técnica de se construir com concreto armado.

1871 – David Saylor, Estados Unidos

David Saylor, um dos proprietários da *Coplay Cement Company* situada no estado da *Pennsylvania*, que desde 1865 produzia cimento natural, patenteia pela primeira vez nos Estados Unidos um método de fabricação de cimento Portland.

É importante salientar que não houve a princípio, interesse dos fabricantes de cimento natural dos Estados Unidos em aprender a produzir cimento Portland, apesar desta tecnologia estar disponível na Europa a muito tempo e de forma já bastante avançada.

Talvez este fato se devesse ao fato do cimento Portland importado da Europa custasse cerca de duas vezes mais que o cimento natural nacional, o que talvez não compensasse sua fabricação nos Estados Unidos.

O cimento importado era bastante barato pelo fato do frete para a América ser bastante barato, pois o cimento era utilizado como lastro para as embarcações (de madeira) que buscavam matéria-prima nos Estados Unidos e de não existirem tarifas alfandegárias.

O maior desenvolvimento da fabricação de cimento Portland nos Estados Unidos só se dá no começo do século XX.

1872 – Isaac Johnson, Inglaterra

Isaac Johnson obtém a patente para um forno a ser utilizado no processo úmido de fabricação do cimento, aonde os ingredientes eram misturados com água, secos e então queimados. Este forno consistia em uma câmara de aproximadamente 30m construída ao lado de um forno comum (em forma de garrafa). O topo do forno era fechado e a chaminé era localizada no lado oposto da câmara horizontal. Nesta câmara era colocada uma quantidade suficiente da mistura líquida para carregar o forno, quando seca. Enquanto uma carga era queimada, a

carga subsequente secava na câmara com o calor proveniente da exaustão do forno.

Entretanto, a operação deste tipo de forno rapidamente se tornou muito onerosa (necessidade de muita mão-de-obra e alto consumo de carvão) e caiu em desuso, cedendo espaço para fornos utilizados no processo de via seca como os fornos verticais contínuos e posteriormente os fornos rotativos.

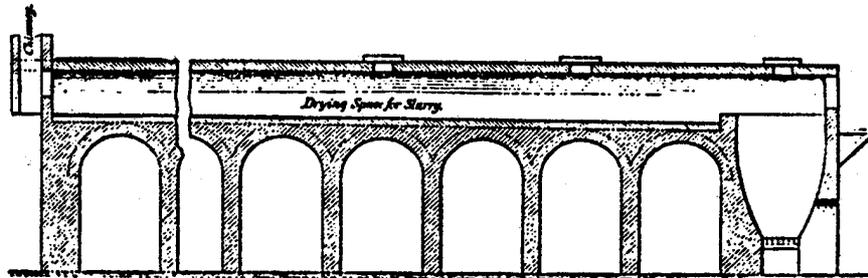


Fig. 29 – Forno de câmara horizontal

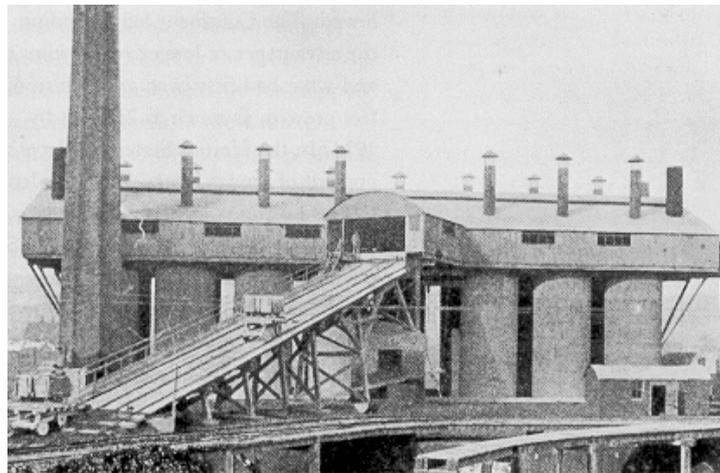


Fig. 30 – Forno vertical contínuo

1873 a 1876 – Ward House, Estados Unidos

Construção da *Ward House* em *Port Chester*, Nova Iorque, de propriedade de William E. Ward.

A casa inteira, à exceção de portas e janelas foi construída em concreto armado, um feito revolucionário para a época.

Foi utilizado um concreto bastante seco. Os pisos foram armados com barras circulares de aço dispostas ortogonalmente a perfis metálicos (perfis I) embebidos em concreto. A armadura das vigas era constituída por perfis metálicos situados na sua porção inferior resistindo os esforços de tração, formando um binário com o concreto comprimido na parte superior da viga segundo explicações do próprio William Ward. As paredes foram construídas com dois painéis com 4cm de espessura cada um, espaçados entre si de 15 a 25cm, acomodando em seu interior um inovador sistema de calefação por irradiação. Os painéis eram unidos entre si aproximadamente a cada metro.

1875 – W. H. Lascelles, Inglaterra

Lascelles explora a utilização de concreto em painéis pré-moldados com o intuito de utilizá-los em residências de baixo custo.

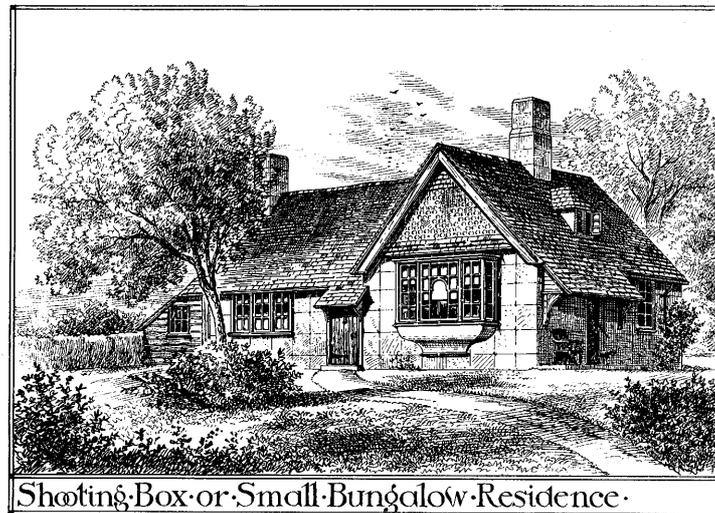


Fig. 31 – Projeto de uma Cabana de Richard N. Shaw utilizando o sistema de Lascelles

O sistema de Lascelles consistia numa armação de madeira (posteriormente substituída por peças metálicas ou de concreto) sobre as quais eram fixados painéis de concreto medindo 1m por 0,66m com espessura de 4cm. Os painéis do forro e das paredes eram armados por duas barras de aço de ½" dispostos diagonalmente e os painéis de piso com uma malha de barras de aço. No telhado, as junções dos painéis eram preenchidas com cimento e tudo era coberto com telhas.

1877 – Thaddeus Hyatt, Inglaterra.

Hyatt publica em 1877 *An Account of Some Experiments with Portland Cement Concrete Combined with Iron as a Building Material*.

Na década de 1870, grande parte do conhecimento dos fundamentos estruturais do concreto armado pareciam recair nos estudos de Hyatt, um fabricante de grades para calçada americano que por causa de problemas políticos acaba sendo enviado para a França, onde toma contato com as primeiras experiências com o concreto armado. Entusiasmado, lança-se posteriormente a experimentar o concreto como nova maneira de construir painéis para calçadas em Londres. Seu artigo de 1877 reúne suas conclusões sobre seus ensaios.

Os testes de Hyatt são considerados um sumário do "essencial" em que o uso do concreto armado é baseado hoje em dia.

Entre as conclusões que Hyatt tirou de seus ensaios é importante mencionar:

- 1) O aço (ou ferro) não resiste bem ao fogo.
- 2) O concreto deve ser considerado como um material de construção resistente ao fogo.

- 3) Envolvendo-se totalmente o aço com uma camada suficientemente espessa de concreto obtém-se um material resistente ao fogo.
- 4) A aderência entre aço e concreto é suficientemente forte para fazer com que a armadura posicionada na parte inferior da viga trabalhe em conjunto com o concreto comprimido da parte superior da viga
- 5) O funcionamento em conjunto do concreto com o ferro chato ou redondo é perfeito e constitui uma solução mais econômica do que com o uso de perfis como armadura.
- 6) O coeficiente de dilatação térmica dos dois materiais é suficientemente igual, garantindo a resistência da combinação aço-concreto quando submetida ao fogo ou ao congelamento.
- 7) A relação dos módulos de elasticidade deve ser adotada igual a 20.
- 8) Concreto com ferro do lado tracionado presta-se não somente para estruturas de edificações como também para a construção de abrigos.

Hyatt foi efetivamente o grande precursor do concreto armado e possivelmente o primeiro a compreender profundamente a necessidade de uma boa aderência entre os dois materiais e do posicionamento correto (nas áreas tracionadas) das barras de ferro para que este material pudesse colaborar eficientemente na resistência do conjunto concreto-aço.

Apesar de toda sua genialidade a falta de patrocinadores para seus testes e restrições impostas por outras patentes impediram que Hyatt se beneficiasse de suas descobertas.

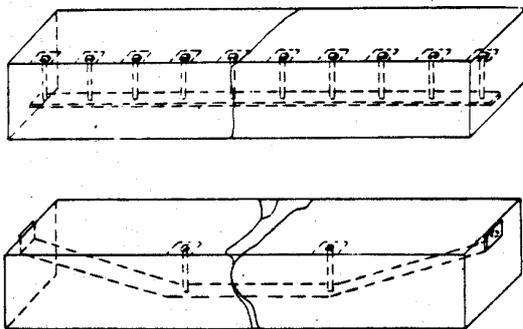


Fig. 32 – Vigas de ensaio de Hyatt com indicação das armaduras e das trincas.

1877 – Joseph Monier, França

Monier patenteia um método para construção de vigas de concreto armado sem qualquer embasamento teórico ou por experimentação sistemática. Como princípio estrutural ele não diferia muito dos sistemas de piso franceses que eram comuns já a algumas décadas.

1878 – Thaddeus Hyatt, Inglaterra.

Hyatt patenteia sua armação reticulada e peças pré-moldadas para lajes e vigas.

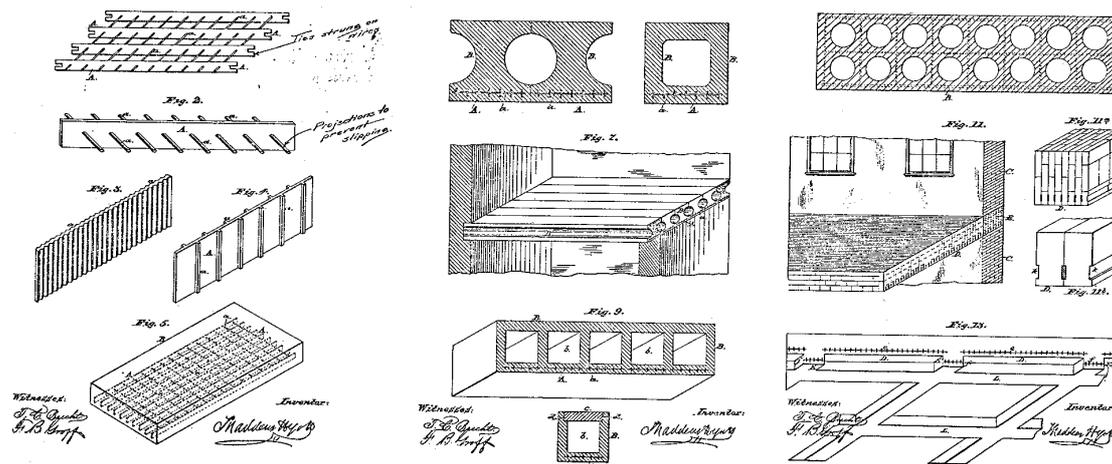


Fig. 33 – Patente de Hyatt de 1878

1880 – J. Grant, Inglaterra

J. Grant mostra a importância do uso das porções mais duras e densas do clínquer. Ingredientes chave são quimicamente analisados.

1884 – G. A. Wayss, Alemanha

Os direitos sobre a patente de Monier são adquiridos por Wayss, um engenheiro civil e construtor alemão que rapidamente empreende uma série de estudos experimentais, auxiliado por outro engenheiro, Matthias Koenen. Em 1887, eles publicam *Das System Monier*, o primeiro livro alemão sobre os fundamentos do concreto armado.

A Wayss e Freytag detentora da patente de Monier toma a liderança no desenvolvimento comercial da construção em concreto armado, dominando o mercado alemão e austríaco e executando muitas obras na França até o surgimento da empresa de Hennebique, oito anos depois.

1884 a 1888 – Ernest L. Ransome, Estados Unidos

O principal uso do concreto armado naquela época se dava em fundações e em pisos arqueados suportados por vigas I metálicas. Ransome substituiu as vigas I por vigas de concreto com armadura de barras circulares situadas na sua porção inferior. Para contornar o problema da aderência entre a armadura e o concreto de maneira simples e barata ele passa a utilizar barras de aço retangulares torcidas. Devido aos bons resultados alcançados, Ransome patenteia a barra retangular torcida de aço como base para seu sistema em 1884.

Em 1888 ao começar a construir estruturas de maior responsabilidade surgem dúvidas sobre a resistência de suas barras torcidas. Para provar a confiabilidade de seu método Ransome submete a segunda laje da *California Academy of Sciences* a

uma prova de carga, que atestou a segurança de seu sistema. No mesmo ano Ransome inova novamente na ampliação de uma fábrica em *Alameda*, Califórnia, substituindo as lajes arqueadas por vigas T.

Na década de 1890, Ransome dedica-se a promover seu sistema, em grande competição com outros sistemas similares.

1885 – Frederick Ransome, Inglaterra

Ransome patenteia o primeiro forno rotativo, que viria no futuro, após serem resolvidas uma série de dificuldades técnicas, a substituir os fornos de cuba vertical.

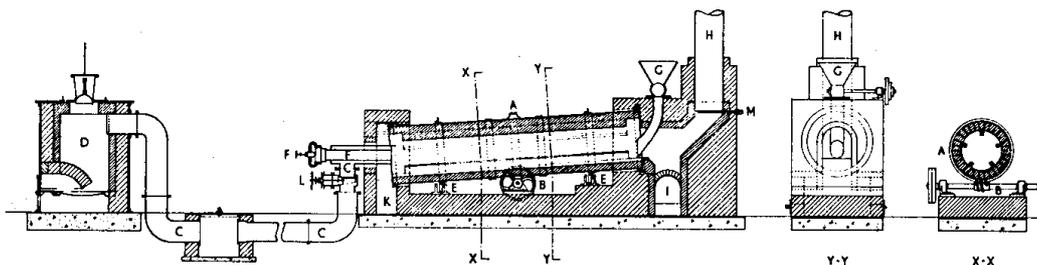


Fig. 34 – Forno Rotativo

1887 – Henri Le Chatelier, França

Henri Le Chatelier estabelece proporções de óxido, utilizadas para se calcular a apropriada quantia de calcário para produzir cimento portland. Ele nomeia os componetes: alita (silicato tricálcico), belita (silicato dicálcico) e celita (aluminoferrato tetracálcico). Ele propõem que o endurecimento é causado pela formação de produtos cristalinos a partir da reação entre cimento e água.

1890 a 1900

Descoberta de que a adição de gipsita ao moer o clínquer age como agente retardador de pega do concreto. Fornos de cuba vertical são trocados por fornos rotativos e moinhos de bolas são adotados para moer o cimento.

1891 – George Bartholomew, Estados Unidos

George Bartholomew executa a primeira rua de concreto dos Estados Unidos em *Bellefontaine, OH*.

1892 – François Hennebique, França

Em 1892 Hennebique adquire patentes sobre o sistema resultante de mais de uma década de experiências construindo estruturas de concreto. Além disso ele estabelece novos moldes para sua atuação. Ele licencia construtores idôneos a

utilizarem seu sistema e passa a atuar como consultor. Construindo uma equipe técnica e apontando agentes em diferentes partes do mundo, ele desenvolve uma organização comercial que permitiu uma rápida expansão mesmo sob um rígido controle de modo a garantir a qualidade das estruturas realizadas com seu sistema. Nos primeiros sete anos a organização de Hennebique executou aproximadamente 3000 projetos, e uma média de 100 pontes por ano. Começando em 1892 com um único escritório, cinco anos mais tarde Hennebique tinha 17 escritórios e 55 licenciados. Em 1909 sua organização chega a 62 escritórios, 43 deles na Europa, 12 nos Estados Unidos e o restante na África e Ásia.

Uma grande parte do sucesso de Hennebique deveu-se mais a notáveis técnicas de administração e marketing (como a publicação de uma revista, contendo boletins técnicos e novas realizações e contratos da empresa) utilizadas do que por inovações técnicas. Pode-se dizer que o papel de Hennebique foi mais de selecionar e compilar boas técnicas já empregadas do que em inovar.

Observa-se em seus trabalhos o emprego de estribos, barras longitudinais e barras dobradas, num arranjo bastante similar ao utilizado atualmente.

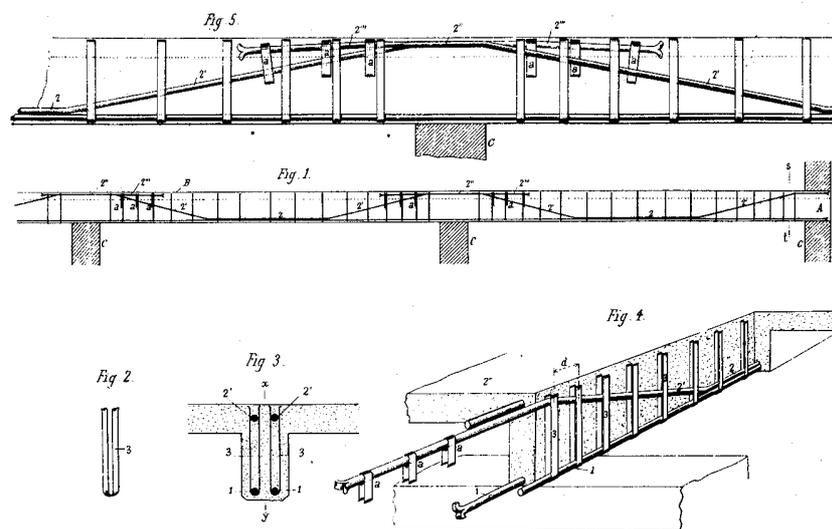


Fig. 35 – Sistema patenteado por Hennebique

1893 – William Michaelis

William Michaelis publica que metassilicatos hidratados formam uma massa gelatinosa (gel) que desidrata com o tempo, endurecendo.

1897 – Ecole des Ponts et Chaussées, França

Têm início o ensino formal do dimensionamento de estruturas de concreto armado, por Charles Rabut.

Até o final do século XIX os avanços da teoria e da prática da construção de estruturas de concreto armado permaneciam muito restritos

pois haviam poucas publicações que disponibilizassem informações técnicas de um modo que pudesse ser empregado prontamente por engenheiros.

Isto começa a mudar com a rápida proliferação de revistas tratando de temas relacionados com cimento e concreto entre 1890 e 1900 e na virada do século, a publicação de livros sobre a engenharia de concreto torna-se mais freqüente, ao mesmo tempo que os países começam a regulamentar o uso do concreto armado. Muitos continham apenas a repetição de rotinas de publicações anteriores mas muitos tornam-se livros clássicos, traduzidos para diversas línguas como os trabalhos de Paul Christophe, Emil Mörsch, Buel e Hill.

1900 a 1910

Análises básicas do cimento são normalizadas.

1902 – Ernest L. Ransome, Estados Unidos

Especializando-se em construções industriais Ransome patenteia em 1902 um sistema em que seu piso constituído por vigas T é combinado com colunões de maneira a formar um pórtico de concreto armado que viria a dominar a construção de fábricas e depósitos.

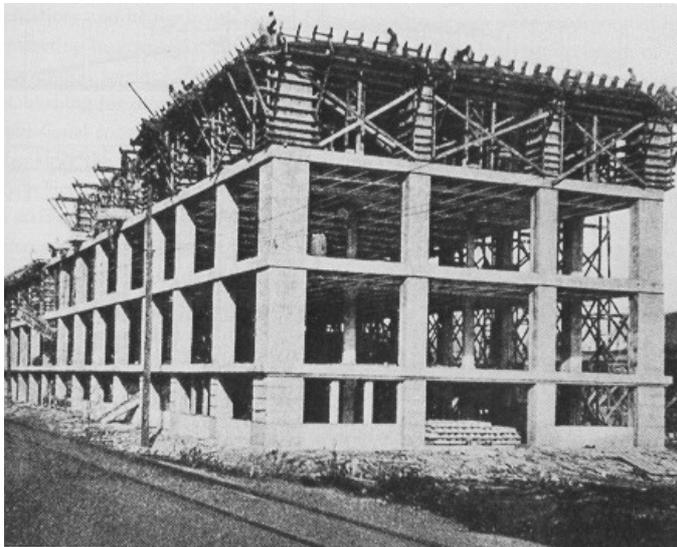


Fig. 36 – Casa de máquinas com quatro pavimentos construída por Ransome em 1901 em Greensburg, Pennsylvania. Pisos e deixam espaço para grandes janelas.

1903- *Ingalls Building*, Cincinnati, OH, Estados Unidos



O *Ingalls Building* foi o primeiro arranha-céu construído em concreto armado, com 16 andares. Projeto da firma de arquitetura Elzner and Anderson teve a estrutura de concreto feita executada com o sistema de Ransome, utilizando lajes planas

Fig. 37– *Ingalls Building*

Com a enorme expansão do uso do concreto armado proliferaram-se acidentes e falhas, cujas causas mais freqüentes eram divididas entre projeto inadequado, emprego de materiais de baixa qualidade e falhas de execução.

Tendo em vista esta situação organizações profissionais e agências governamentais movimentaram-se para trazer ordem à extraordinária variedade de teorias, fórmulas e práticas empregadas.

1903 a 1906 – John Brodie, Inglaterra

Construção de casas pré-fabricadas de baixo custo (populares) em Liverpool utilizando um sistema desenvolvido por Brodie em 1901.

1904 – Início da normalização do concreto, Alemanha

Em 1904 a Associação Germânica de Arquitetos e Engenheiros juntamente com a Associação Alemã do Concreto iniciaram o projeto preliminar de normalização para dimensionamento, execução e ensaio de estruturas de concreto armado que se tornaram base para a regulamentação que logo depois foi promulgada pelo governo da Prússia.

Os regulamentos determinaram a exame de projetos pelas autoridades da

construção, sendo que seus relatórios seriam utilizados dois anos depois para uma revisão destes regulamentos.

1905 a 1908 – Thomas A. Edison, Estados Unidos

Thomas Edison desenvolve um sistema de formas metálicas para construção de casas. A idéia era construir um molde metálico único para toda a estrutura e preenchê-lo com concreto fluido despejado por cima.

1905 a 1910 – Wet-Mix Era, Estados Unidos

Até o final do século XIX eram utilizado um concreto bastante seco, difícil de ser moldado, requerendo muita mão-de-obra para compactar o concreto lançado para nem sempre obter um bom resultado, pois era difícil de preencher os vazios, o que faz com que concretos mais plásticos (com mais água) passassem a ser utilizados.

Com o aumento do custo da mão de obra no começo deste século, os construtores viram-se encorajados a utilizar uma maior mecanização do lançamento do concreto. O uso de guindastes e tubos força mais uma vez a uma liquidação do concreto.

Entretanto, estudos publicados em 1912 e 1918 estabelecem a relação direta entre o fator água/cimento e a resistência final do concreto, acabando com o uso indiscriminado de água na mistura do concreto nos Estados Unidos. Passa-se a ter um cuidado maior no proporcionamento dos agregados de modo a obter-se um concreto trabalhável com um baixo fator água/cimento.

1905 a 1910 – C. Turner e Robert Maillart, Estados Unidos e Suíça

No período de 1905 a 1910 Turner e Maillart desenvolvem separadamente sistemas de armação e construção de lajes cogumelo. A principal vantagem em relação ao processo convencional de lajes apoiadas em vigas que se apoiavam em pilares era a economia de fôrmas.

1906 – Normalização do concreto, França

A França promulga suas normalização, bastante liberal, expressando o desejo de encorajar as experiências e o avanço da tecnologia . Tensões máximas admissíveis para aço, ferro e diferentes tipos de concreto são estabelecidas em valores conservadores para a época, gerando várias críticas.

1907 – Publicação do 1º Relatório do *Joint Committee*, Inglaterra

É publicado o primeiro relatório do *Joint Committee* uma junta criada em 1906 com membros do *Concrete Institute*, que reunia o *Reinforced Concrete Committee*,

British Fire Prevention Committee e empresas atuantes na área. Nos quatro anos seguintes são publicadas revisões deste primeiro código de 1907, muito similar ao código de concreto armado francês.

Em 1915 quando o *London County Council* promulga a regulamentação para a área metropolitana, este diferia muito pouco da versão do *Joint Committee*.

Apesar de provas de carga terem convencido os mais cépticos sobre a resistência do concreto, ainda pairavam dúvidas sobre sua durabilidade. Havia um receio generalizado que as barras de ferro enferrujassem no interior do concreto e perdendo resistência levassem ao colapso da estrutura. Este temor só é superado por volta de 1910, quando várias estruturas foram demolidas, encontrando-se em seu interior barras com até 60 anos de idade em perfeito estado de conservação.

1911 – John E. Conzelman, Estados Unidos

Conzelman desenvolve um sistema de construção pré-fabricada entre 1910 e 1916 e em 1911 constrói um edifício de cinco andares para a *National Lead Company* em *St. Louis, Missouri*.

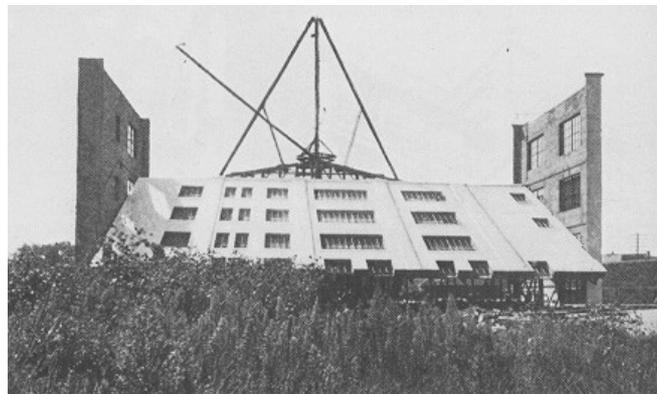


Fig. 38 – Fábrica construída com pré-moldados em Rogers Park, Illinois, 1911

1917 – Publicação das normas norte-americanas

Normas para a utilização do concreto armado são desenvolvidas nos Estados Unidos por uma junta, que incluía representantes *do American Society for Testing and Materials* e organizações dos engenheiros civis, engenheiros ferroviários e fabricantes de cimento. Tendo achado que os resultados e interpretações dos testes realizados até o momento eram inconclusivos, a junta americana decidiu instituir um programa de pesquisa, distribuindo recursos a 11 Universidades. Em 1903 começam sete anos de testes de laboratório seguidos de cinco anos de testes em edifícios reais. Apesar de todo este trabalho quando as normas são publicadas em 1917

sofrem duras críticas.

Anos 20 – Introdução do Concreto Pré-Misturado

A qualidade do mistura do concreto passa a ser muito melhor controlada após a introdução do concreto preparado em usina.

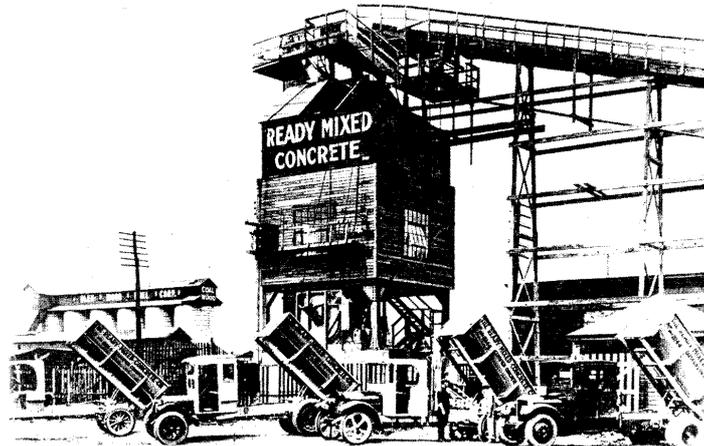


Fig. 38 – Usina de Concreto

1929 – Linus Pauling, Estados Unidos

Dr. Linus Pauling formula um conjunto de princípios para o estrutura de silicatos complexos.

1930

Agentes incorporadores de ar são introduzidos para aumentar a resistência do concreto aos danos devidos ao efeito congelamento / descongelamento .

1934 – Eugène Freyssinet, França

Freyssinet demonstra as vantagens da protensão, principalmente após conseguir a consolidação das fundações da Estação Marítima do Havre.

Entretanto, o desenvolvimento da protensão começou verdadeiramente no final da 2ª Guerra Mundial, em 1945, com o nascimento da STUP – *Société Technique pour l'Utilization de la Précontrainte*.

1936 – Estados Unidos

São construídas as primeiras grandes barragens de concreto, *Hoover Dam* e *Grand Coulee Dam*.

1956 – Estados Unidos

Congresso Norte-Americano firma o *Federal Interstate Highway Act*

1967 – Estados Unidos

Primeira estrutura esportiva em forma de domo em concreto é construída na Universidade de Illinois, em *Urbana-Champaign*.

Década de 70

Introdução do concreto reforçado com fibras e de concretos de alta resistência.

1975 Canadá

Construção da *CN Tower* em *Toronto*, a mais alta torre auto-portante jamais construída.



Fig. 39 – *CN Tower*, Toronto, Canadá

1975 – *Water Tower Place*, Estados Unidos

Construção da *Water Tower Place* em Chicago, *Illinois*, na época o maior edifício construído em concreto armado.

Década de 80

Superplastificantes são introduzidos nas misturas.

1985

Fumo de sílica é introduzido como um aditivo pozolânico. O concreto mais resistente jamais obtido é usado na construção do *Union Plaza* em *Seattle*.

1996 – Petronas Towers, Malásia

Completado em 1996 as torres gêmeas de 88 andares possuem uma altura total de 452m, tornando-se o edifício comercial mais alto do mundo construído em concreto armado.



Fig. 40 – Petronas Towers, *Kuala Lumpur*, Malásia

Presente e Futuro do Concreto

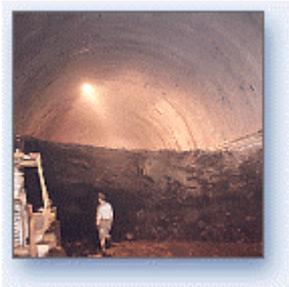
O concreto evoluiu muito desde o tempo de Roma. A engenharia usa concreto atualmente em campos muito diversos, em muitos casos sob ambientes extremamente agressivos. Para se adaptar aos novos e desafiadores usos o homem criou uma infinidade de tipos de concretos, utilizando uma enorme gama de cimentos, agregados, adições, aditivos e formas de aplicação (armado, protendido, projetado,...). Encontramos concreto na fundação de plataformas petrolíferas no dos oceanos ou enterrado a centenas de metros abaixo da terra em fundações, túneis e

minas a 452m acima do solo em arranha-céus.

O grande desafio da tecnologia de concreto atualmente parece ser aumentar a durabilidade das estruturas, recuperar estruturas danificadas e em entender o complexo mecanismo químico e mecânico dos cimentos e concretos. Para isto, uma nova geração de concretos está sendo desenvolvida, métodos tradicionais de execução e cálculo de concreto estão sendo revistos, teorias não-lineares e da mecânica do fraturamento estão sendo desenvolvidas.

Alguns Concretos Especiais:

- Concreto de Alto Desempenho
- Concreto Compactado com Rolo
- Concreto Projetado
- Concreto Protendido
- Concreto com adição de fibras







3. Bibliografia

3.1 Livros e Publicações

Elliott, Cecil D.

The Development of Materials and Systems for Buildings, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1992.

Mark, Robert.

Architectural technology up to the scientific revolution: the art and structure of large-scale buildings, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1993.

Vasconcelos, Augusto Carlos de .

Concreto no Brasil: Recordes, Realizações, História, Copiare, São Paulo, 1985.

Concreto Protendido

Publicação Técnica da Freyssinet , Rio de Janeiro, 1996

3.2 Internet

Toronto's CN Tower Welcomes You!

<http://www.cntower.ca/frame.html>

THE ART - História da Arte

<http://www.geocities.com/Broadway/Stage/4790/histarte.html>

HOOVER DAM

<http://www.hooverdam.com>

Materials Science and Engineering of University of Illinois

<http://matse1.mse.uiuc.edu>

HAZAMA CORPORATION

<http://>

Altavista

<http://www.altavista.com>