

ARTIGOS ABRASFE

Pressão Lateral do Concreto *Conceitos Técnicos*

Breno Santos



ABRASFE

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS
DE FÓRMAS, ESCORAMENTOS E ACESSO

11 2276-7994
contato@abrasfe.org.br

Av. Jabaquara, 2049 – Sala 101
São Paulo/SP - CEP 04045-003

www.abrasfe.org.br

Pressão

A pressão é definida como uma força aplicada perpendicularmente a área de uma superfície, através da seguinte expressão:

$$P = \frac{F}{A}$$


Sendo a unidade utilizada, de acordo com o Sistema Internacional (SI), o Pascal, que corresponde a N/m^2 . Em dimensionamentos de fôrmas é comum a utilização do kN/m^2 (sabendo-se que $1,00 kN/m^2$ é igual a $1000 N/m^2$).

Esta expressão nos leva a conclusão que, para uma mesma força aplicada, quanto menor a área da superfície de contato, maior a pressão produzida (grandezas inversamente proporcionais). A imagem abaixo exemplifica este conceito, onde, na situação à esquerda, toda a força (peso) é aplicada em uma menor área (equivalente aos pontos de apoio dos pés), ocasionando uma maior pressão existente no solo em comparação com a situação à direita, onde a força é distribuída através de todo o corpo, resultando em um menor valor comparativo de pressão, devido a maior área de contato do corpo com o solo.



Pressão Hidrostática

Da mesma forma que os corpos sólidos, os fluidos exercem pressão, devido ao seu peso (que está correlacionado com a densidade do material).

A hidrostática, também chamada estática dos fluidos (hidrostática refere-se à água, que foi o primeiro fluido a ser estudado) é a parte da física que estuda as forças exercidas por e sobre fluidos em repouso.

Um fluido é toda substância que não possui forma própria, se deformando continuamente quando submetida à ação de pequenas forças. De maneira simples, pode-se dizer que um fluido adquire o formato do recipiente que o contém. Os fluidos incluem basicamente os líquidos e os gases, estando, portanto, o concreto durante a sua fase líquida incluído neste meio.



ABRASFE
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS
DE FÔRMAS, ESCORAMENTOS E ACESSO

11 2276-7994
contato@abrasfe.org.br

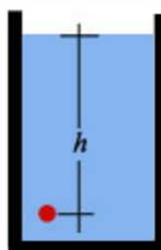
Av. Jabaquara, 2049 - Sala 101
São Paulo/SP - CEP 04045-003

www.abrasfe.org.br

A pressão exercida pelos fluidos é sempre perpendicular à superfície, variando de acordo com a profundidade. A pressão hidrostática é a pressão que é gerada pelo peso do líquido acima de um ponto de medição, quando o líquido está em repouso. Para determinar a pressão hidrostática de um líquido em particular, é necessário o conhecimento prévio da densidade do líquido e a gravidade local.

Consideremos um recipiente contendo um líquido de densidade d em um ponto do recipiente de altura h , e em um local do planeta onde a aceleração da gravidade é g . A pressão hidrostática é expressa por:

$$P_{\text{hidro}} = d \cdot g \cdot h$$



Em que, usando unidades no sistema SI,

P é a pressão hidrostática (em Pascal);

d é a densidade (em quilogramas por metro cúbico);

g ou a é a aceleração da gravidade (em metros por segundo quadrado);

h é a altura do líquido por cima do traço (em metros).

Pressão Lateral do Concreto Fresco

O dimensionamento e a construção de uma fôrma eficaz requer a compreensão básica de como se comporta o concreto, uma vez que este exerce pressão lateral sobre a fôrma, em moldes similares ao conceito da pressão hidrostática explanado acima. As fôrmas são concebidas de acordo com o valor da pressão lateral imposta pelo concreto, pois esta provoca choque nas fôrmas durante a concretagem; com o conseqüente adensamento, e por fim, a fase de pega do cimento até o endurecimento. Tais fases são importantes para o estudo da pressão lateral.

O concreto possui componentes que se encontram entre líquidos e sólidos, sendo desta forma, melhor descrito usualmente como um material plástico. Com o passar do tempo, o concreto perde sua capacidade plástica, modificando para o estado sólido. Esta propriedade de mudar de um fluido para um sólido faz do concreto um valioso material de construção que pode ser facilmente moldado pelas fôrmas antes de atingir o seu estado final. A capacidade de mudar de um semilíquido para um estado sólido é basicamente o resultado de duas ações dentro do concreto. A primeira destas ações é o endurecimento do cimento, que deve iniciar dentro de 30 minutos após a mistura do concreto em condições positivas, ou seja, uma temperatura morna. Esta ação pode continuar por várias horas, especialmente se a temperatura é baixa. A segunda ação é o desenvolvimento do atrito interno entre as partículas de agregado no concreto, que lhes impede de se mover livremente umas sobre as outras. A magnitude do atrito interno é maior no concreto seco do que em um molhado, aumentando com a perda de água do concreto.



ABRASFE

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS
DE FÔRMAS, ESCORAMENTOS E ACESSO

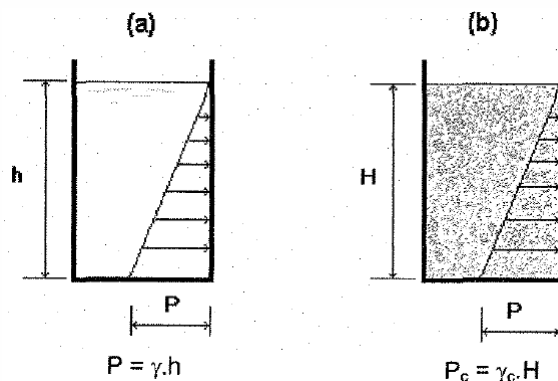
11 2276-7994

contato@abrasfe.org.br

Av. Jabaquara, 2049 - Sala 101
São Paulo/SP - CEP 04045-003

www.abrasfe.org.br

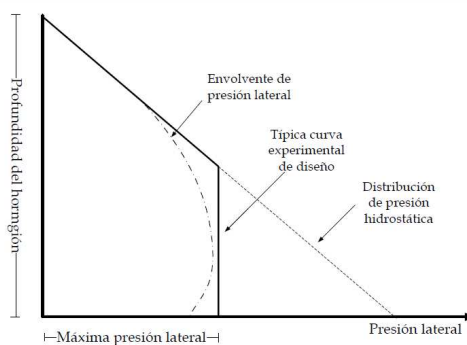
Sendo o concreto lançado numa fôrma, ele é contido pelas suas laterais, que impedem o abatimento sobre fundo. Para reter a mistura, a fôrma necessita responder a pressão causada pela massa, que tende a posição de equilíbrio. Sabe-se que os líquidos, quando mantidos em um reservatório, exercem pressão sobre as paredes laterais, cujo valor dependerá de sua densidade e da altura que atinge em relação ao fundo do recipiente. Portanto o concreto agirá de modo similar, porém, não sendo a mistura inerte e nem homogênea, vários fatores podem fazer variar esse quadro, e a comparação não será válida com o passar do tempo desde o fim da vibração.



A pressão na fôrma existe enquanto o concreto está em um estado líquido, estando a taxa de decaimento desta pressão relacionada com a velocidade de endurecimento do concreto. Segue-se que quanto mais fluido for o concreto (alto slump), maior será a pressão lateral. Por outro lado, um concreto com baixo slump provoca uma menor pressão lateral.

Após longos anos de discussão, exames laboratoriais e investigações de campo ainda não existe um pleno acordo relativo aos valores da pressão lateral do concreto. Possivelmente, a questão da variação desta pressão, não será totalmente resolvida por conta da evolução contínua dos métodos de concretagem/adensamento, bem como a tecnologia do concreto. No entanto, a fôrma deve ser dimensionada através de um projeto seguro, baseado em normas técnicas, com hipóteses viáveis para as condições do tipo de trabalho a ser realizado.

A figura abaixo demonstra a envoltória de pressão lateral do concreto fresco vibrado aceita na bibliografia atual, a típica curva experimental de projeto para fôrmas verticais e a distribuição hidrostática para um líquido com a mesma densidade do concreto



Pressão Hidrostática para o Concreto

A pressão do Concreto recém-colocado (fresco) em fôrmas de paredes e pilares comporta-se como a pressão hidrostática que atua lateralmente sobre as faces verticais da fôrma. No entanto, devido ao endurecimento do concreto com o tempo, a pressão hidrostática é apenas temporária. A medida que o concreto varia do estado líquido para um quase sólido, a pressão lateral diminui.

Dependendo da velocidade de concretagem e das características do concreto, a pressão lateral pode ser igual à pressão hidrostática ao longo de toda a altura, tendo o concreto o comportamento de um fluido perfeito.

A pressão hidrostática completa pode ocorrer quando a velocidade de concretagem é alta e a taxa de endurecimento é lenta ou atrasada devido a retardadores químicos, cimentos compostos, materiais cimentícios suplementares, ou a condições climáticas de baixa temperatura. Isto é especialmente verdadeiro para os pilares e as paredes que podem ser preenchidos rapidamente antes que o início de endurecimento do concreto ocorra.

Falando sobre concreto convencional fresco aproximadamente dezoito parâmetros influenciam a pressão sobre a fôrma vertical. Todos os parâmetros, de acordo com as respectivas condições, afetam a pressão com diferentes intensidades.

Primeira Ordem	Segunda Ordem	Terceira Ordem
Velocidade de Concretagem	Tempo de Solidificação	Tipo de Concretagem
Densidade do Concreto	Aditivos	Agregados e Tamanho Máximo dos Grãos
Tipo de Compactação	Pressão nos Poros d'água	Tipo do Cimento
Tipo e Profundidade do Vibrador	Tempo de Vibração	Temperatura do Ambiente
Consistência do Concreto	Dimensionamento e Tipo da Fôrma	Altura de Concretagem e Altura Total
Temperatura do Concreto Fluido	Permeabilidade da Fôrma	Armação

Com conhecimento que mais de uma dúzia de fatores podem influenciar a pressão do concreto contra as fôrmas, listaremos no próximo tópico algumas destas variáveis.

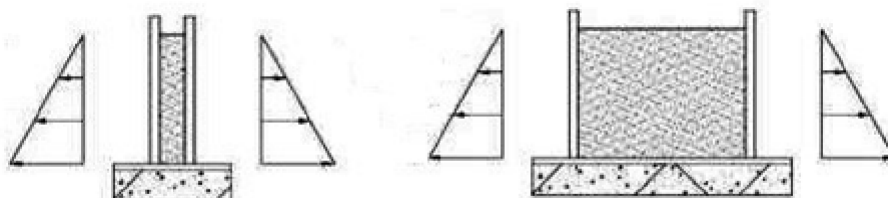
Fatores que afetam a Pressão do Concreto

Se a velocidade de concretagem não for alta o suficiente para manter todo o concreto com comportamento líquido, ocorrerá que o concreto na parte inferior da fôrma começa a modificar para o estado quase sólido antes da concretagem ter sido concluída. Quando isto ocorre, a pressão lateral no fundo da fôrma é menor do que a pressão hidrostática total. Esta pressão hidrostática modificada é influenciada por uma série de fatores, conforme visto acima. Abaixo exemplificaremos em maiores detalhes alguns destes fatores.

1) Altura de Concretagem: Antes do concreto endurecer, ele age como um líquido ideal e pressiona a fôrma do mesmo modo que, por exemplo, a água pressiona as paredes de

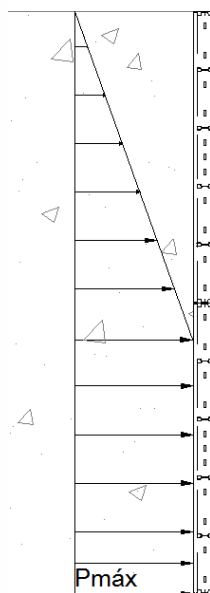


um reservatório. A pressão em qualquer ponto na fôrma é diretamente determinada pela altura do concreto acima deste ponto, a densidade do concreto e gravidade do local. Recordamos que a pressão não é afetada diretamente pela espessura da parede, e sim por sua altura.



2) Velocidade de Concretagem: A taxa média de incremento vertical do concreto fluido sob a fôrma em relação ao tempo decorrido de concretagem é referido como a velocidade de concretagem e expressa usualmente em metros por hora (m/h). Com a concretagem em andamento, a pressão lateral num determinado ponto aumenta à medida que a altura de concreto acima deste ponto também aumenta.

A pressão do concreto em qualquer ponto sobre a fôrma é diretamente proporcional à altura do concreto fluido acima dela. Se o concreto começa a endurecer antes da concretagem estar finalizada, a pressão hidrostática não se desenvolverá e a pressão contra as fôrmas será menor do que se a concretagem for concluída antes do concreto endurecer. Uma vez que o concreto endurece este não exerce mais pressão sobre as fôrmas. O diagrama a seguir ilustra como a pressão do concreto na fôrma varia quando o concreto inicia o processo de pega. É possível visualizar que no trecho superior, pelo concreto estar totalmente líquido, o comportamento da pressão é igual à hidrostática, porém a partir de determinado momento, a pressão se mantém constante, sem incremento, até o momento de total dissipação, pelo concreto ter completado o processo de endurecimento, não mais pressionando a fôrma.



Quando a velocidade de concretagem é elevada a pressão do concreto também aumenta, pois teremos uma maior altura hidrostática.

3) Densidade do Concreto: *A pressão exercida contra as fôrmas é diretamente proporcional a densidade do concreto. O Concreto leve exercerá uma pressão menor do que o concreto de densidade normal.*

4) Temperatura: *O tempo que o concreto leva para endurecer é influenciado pela sua temperatura. Quanto mais elevada for à temperatura do concreto e do ambiente, mais rápido ocorrerá o início do endurecimento. A maioria dos projetos de fôrmas no Brasil são baseados em uma média de temperatura ambiente e temperatura do concreto de 25 °C. Em baixas temperaturas ambientes, o endurecimento do concreto é retardado, sendo necessário diminuir a velocidade de concretagem ou utilizar medidas de isolamento térmico para impedir elevadas pressões contra a fôrma.*

Uma vez que as propriedades mecânicas do concreto são dependentes da temperatura, quanto mais elevada à temperatura inicial do concreto e / ou do ambiente, menor a pressão lateral será. Em consequência, também ocorrerá uma maior taxa de queda da pressão com o tempo. Isto é atribuído a velocidade mais rápida da estrutura



tornar-se autoportante, devido a hidratação do cimento ter respostas rápidas a temperaturas mais elevadas.

A Temperatura do concreto no momento da concretagem tem uma influência importante sobre as pressões porque afeta o tempo de endurecimento do concreto. Em baixas temperaturas, o concreto leva mais tempo a endurecer e, por conseguinte, uma maior altura é concretada antes da parte inferior torna-se firme suficiente. A maior altura hidrostática existente, portanto, resulta em pressões laterais superiores. É particularmente importante manter isso em mente ao projetar fôrmas que serão concretadas em baixas temperaturas.

5) Tipo de Concreto: *O tipo de cimento irá influenciar a velocidade na qual o concreto endurece. Um concreto de alta resistência inicial endurecerá mais rápido do que o concreto normal e permitirá que uma velocidade de concretagem maior seja utilizada.*

De modo geral, o aumento do teor e da dimensão do agregado dá lugar a uma pressão lateral inicial inferior, isto é atribuído ao atrito interno do agregado graúdo levando carga hidrostática, no entanto, se o teor das partículas finas é aumentado, a capacidade do agregado graúdo para transportar cargas diminui, e a pressão lateral é aumentada.. Em contraste, as misturas de concreto ricos desenvolvem uma maior pressão do que misturas normais. Aumentando o teor de água cimento, ocorre também aumento na pressão lateral.

6) Vibração: *Na prática construtiva convencional, o concreto é moldado em fôrmas de paredes ou pilares sendo vibrado para que ocorra a consolidação do concreto. O concreto é geralmente consolidado através de vibradores de imersão, que estão imersos a cerca de um metro de profundidade da camada superior existente do concreto.*

A vibração interna consolida o concreto, fazendo com que ele se comporte como um líquido puro, atenção redobrada deve existir com vibração interna excessiva do concreto recém-inserido na fôrma. Técnicas de consolidação podem ser responsáveis por

falhas na fôrma, por forçar o concreto a permanecer em comportamento semi líquido mais do que o previsto, ou por agitação excessiva das fôrmas.

Vibração externa, também chamada de vibração através das fôrmas, é realizada pela fixação dos vibradores na parte exterior da fôrma. A fôrma em si é vibrada e por sua vez, transmite esta vibração para o concreto. A vibração externa martela a fôrma contra o concreto, causando grande flutuação na pressão lateral. A frequência e amplitude da vibração externa devem ser dimensionadas e ajustadas em campo para que consolide o concreto. Cuidados devem ser tomados quando se utilizam vibradores externos porque estes resultam em pressões maiores nas fôrmas em comparação com a vibração interna. A vibração externa exige fôrmas especialmente dimensionadas.

Revibração é o processo de vibrar novamente um concreto que já tenha sido vibrado anteriormente, ou seja, é uma nova vibração, executada após concluídas as operações normais de lançamento e adensamento, mas antes do fim de pega do concreto. Durante o processo de revibração o vibrador é forçado para baixo através do concreto recentemente colocado em camadas que já atingiram determinada rigidez.

Em geral, os efeitos da revibração e vibração externa não foram suficientemente investigados para serem expressos em fórmulas padrões e, portanto, as fórmulas para obtenção da pressão do concreto são limitadas a utilização de vibradores internos no momento da concretagem.

7) Classes de Consistência: *A consistência é um dos principais fatores que influenciam na trabalhabilidade do concreto, caracterizando a moldabilidade e a fluidez do concreto. Um dos métodos mais utilizados para determinar a consistência é o ensaio de abatimento do concreto, também conhecido como slump test. Quando o concreto possui um slump muito baixo, ele age menos como um líquido e transmitirá uma menor pressão à fôrma, sendo o inverso também real, ou seja, quanto maior o slump mais fluido é o concreto, ocasionando maiores pressões transmitidas às fôrmas.*



8) Aditivos Químicos: Nos últimos 40 anos, as misturas de concreto mudaram significativamente. O desenvolvimento de adições sofisticadas que alteram a trabalhabilidade do concreto, bem como a introdução de novos materiais cimentícios, tais como cinzas volantes, escória, e sílica ativa, introduziram a possibilidade de pressões de concretagem mais elevadas. O crescente uso de bombas com maiores vazões para concretagens rápidas também criou o potencial para pressões mais elevadas.

Atualmente, os aditivos são comumente usados nas misturas de concreto. Os aditivos incluem líquidos, sólidos, pós, ou produtos químicos que são adicionados a uma mistura de concreto para alterar as propriedades da mistura básica de água, cimento, areia e agregado. Eles podem acelerar ou retardar tempos de pega, diminuir a permeabilidade da água, ou aumentar a resistência, teor de ar, e trabalhabilidade. Aditivos incluem pozolanas como sílica, escória de alto forno e cinzas volantes. A pressão do concreto na fôrma depende basicamente do tipo de cimento e dos aditivos utilizados na mistura base de concreto.

Os superplastificantes, por exemplo, afetam tanto a pressão lateral inicial, quanto a taxa de decaimento desta pressão, visto que o concreto permanece em seu estado líquido por um maior período de tempo. Também é mostrado que a adição de materiais suplementares de cimento, tais como cinzas volantes, sílica, ou escória de alto forno, afetam a pressão lateral e, mais especificamente, a sua taxa de decaimento. Isto é atribuído à natureza tixotrópica do concreto que muda com a inclusão destes materiais. Cinzas volantes ou outro material utilizado como substituto de cimento a baixa temperatura ambiente, ou aditivos retardadores, tem efeito significativo sobre a pressão lateral, que não deve ser esquecido.

8) Outras Variáveis: Outras variáveis mensuradas ao longo da história, que afetam as pressões laterais incluem a quantidade e localização da armação, a pressão da água nos poros, os procedimentos de concretagem, a profundidade e extensão da concretagem, a rigidez e permeabilidade das fôrmas dentre outros fatores. No entanto, com as práticas de concretagem usuais, a gama destes efeitos variáveis é geralmente pequena e negligenciada.

Pressão Admissível de Concretagem

Fôrmas de pilares e paredes nunca devem ser expostas a pressões laterais superiores a pressão máxima admissível para a qual foram dimensionadas. Caso contrário, o risco de deformações excessivas aumentará significativamente, além de, em último caso, à possibilidade da ruptura do sistema de fôrmas. Embora não seja uma ameaça à vida, deformações excessivas, saliências, fôrmas fletidas e danificadas impactam em um alto custo e podem atrasar cronogramas de construção, especialmente se os pilares ou paredes estão fora da tolerância permitida e necessitam de reparos.

A literatura do fornecedor, bem como, os projetos de fôrmas devem sempre mostrar a pressão máxima de concretagem permitida. Utilizando a pressão máxima de concretagem permitida e as equações normativas, é possível calcular a velocidade máxima de concretagem, para, deste modo, não ocorrer uma concretagem demasiada rápida, excedendo a pressão máxima para a qual a fôrma foi dimensionada e fabricada. Para simplificar este cálculo, muitas referências e fabricantes de fôrmas fornecem tabelas com as velocidades de concretagem permitidas para diferentes pressões admissíveis e classes de concreto.

É possível evitar a alta pressão através de um planejamento cuidadoso da velocidade de concretagem. Certifique-se de estar ciente da pressão admissível da fôrma, e da velocidade de concretagem permitida ou corre-se o risco de expor a fôrma a uma pressão maior do que a dimensionada.

Ao considerar a pressão nas fôrmas, dois itens principais devem ser considerados para garantir projetos com segurança e sistemas de fôrma rentáveis. O primeiro item é a pressão lateral máxima desenvolvida pelo concreto fluido. Este valor é o mais crítico porque afeta diretamente a concepção dos sistemas de fôrmas. A taxa de decaimento da pressão com o tempo é também de interesse especial. Nas investigações de pressões laterais realizadas, utilizando uma consistência normal de concreto, a pressão diminui lentamente até cair para zero cerca de 3 h após a concretagem. Melhor conhecimento da taxa de diminuição da pressão permite uma melhor programação da concretagem. Isto é particularmente verdadeiro no caso de concretagens em elementos profundos e largos que requerem considerável volume de concreto. O tempo decorrido antes do cancelamento de pressão também é importante para um melhor escalonamento da reutilização da fôrma.



ABRASFE

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS
DE FÔRMAS, ESCORAMENTOS E ACESSO

11 2276-7994
contato@abrasfe.org.br

Av. Jabaquara, 2049 – Sala 101
São Paulo/SP - CEP 04045-003

www.abrasfe.org.br

Referências:

<http://www.fisica.net/hidrostatica/pressao.php>

<http://pt.slideshare.net/vlamirocha/hidrostatica-29090657>

<http://pt.slideshare.net/vlamirocha/hidrostatica-29090657>

<http://www.sensorsone.com/hydrostatic-pressure/>

<http://www.sofisica.com.br/conteudos/Mecanica/EstaticaeHidrostatica/pressao2.php>

<https://pt.wikipedia.org/wiki/Hidrostatica>

https://en.wikipedia.org/wiki/Vertical_pressure_variation

<http://www.estudopratico.com.br/hidrostatica/>

<http://www.colegioweb.com.br/hidrostatica/o-que-e-hidrostatica.html>

<http://www.colegioweb.com.br/hidrostatica/o-que-e-hidrostatica.html#ixzz45SBEjqZT>

<http://www.forconstructionpros.com/article/10289332/avoid-too-much-pressure-when-placing-concrete>

ACI 347-04 Guide to Formwork for Concrete

<http://www.forconstructionpros.com/article/10289332/avoid-too-much-pressure-when-placing-concrete>

<http://theconstructor.org/building/concrete-formwork-design-considerations/8279/>

<http://www.solidcheck.de/en/concrete-know-how.html>

http://www.concreteconstruction.net/Images/Pressure%20on%20Wall%20and%20Column%20Forms_tcm45-590115.pdf

<http://www.rmc-foundation.org/images/SCC%20Formwork%20Pressure%20Task%20I%20Report.pdf>

M.K. Hurd, Formwork for Concrete

The Concrete Society - Formwork A guide to good practice

Formwork for Concrete Structures

Robert L. Peurifoy, Garold D. Oberlender, Formwork for Concrete Structures

http://www.concreteconstruction.net/Images/Pressure%20on%20Wall%20and%20Column%20Forms_tcm45-590115.pdf

<http://courses.washington.edu/cm420/Lesson1.pdf>

Tilo Proske, Carl-Alexander Graubner, Self-Compacting Concrete- Pressure on Formwork and Ability to Deaerate

Rosana Máximo da Cruz – Pressão Lateral em Fôrmas para Concreto



ABRASFE
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS
DE FÔRMAS, ESCORAMENTOS E ACESSO

11 2276-7994
contato@abrasfe.org.br

Av. Jabaquara, 2049 - Sala 101
São Paulo/SP - CEP 04045-003

www.abrasfe.org.br