

DUTOS DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS PARA RISERS

Ricardo Franciss

Universidade Católica de Petrópolis, Centro de Engenharia e Computação
ricardo.franciss@ucp.br

Robson Gaiofatto

Universidade Católica de Petrópolis, Centro de Engenharia e Computação
robson.gaiofatto@ucp.br

Ricardo Grecchi

Universidade Católica de Petrópolis, Centro de Engenharia e Computação
ricardo.grecchi@ucp.br

RESUMO

Este artigo apresenta a descrição do estado de desenvolvimento de um projeto de pesquisa, onde se estuda a viabilidade técnica da utilização de um novo tipo de material para sua aplicação em risers. Estes elementos de grande importância na produção de petróleo, hoje são feitos em aço e estão no limite de sua capacidade resistente, considerando-se as atuais profundidades de exploração de petróleo. Para ser possível atingir maiores profundidades de exploração, novos materiais serão necessários e é dentro deste panorama que se encontra o presente projeto de pesquisa, onde as principais características utilizadas na escolha deste material foram a baixa densidade - 2400 kg/m^3 - contra 7850 kg/m^3 e a sua alta resistência à corrosão.

Neste artigo, fica demonstrado, através de ensaios experimentais, que apresentam as características do material proposto, a viabilidade de uso desta técnica alternativa, de custo muito reduzido, excelente durabilidade e reduzida agressividade ambiental. A demonstração se baseia em comparações numéricas das características do material e as solicitações a serem suportadas em casos bastante críticos, obtidas com auxílio do programa de elementos finitos chamado ANFLEX, desenvolvido pela Petrobras. Estas análises forneceram os níveis de esforços nas juntas do riser, em modelagens simulando lâminas d'água de 3000 m de profundidade e variados tipos de plataformas, considerando ainda a ocorrência de ondas decenárias, que representam uma condição de uso destes elementos em condições muito críticas de solicitações.

Palavras-chave: *Risers, Material Alternativo, Concreto Pró-Reativo*

1 INTRODUÇÃO

Com a descoberta de petróleo sob lâminas de água cada vez mais profundas, a produção de petróleo vem tornando-se cada vez mais complexa, envolvendo esforços mais elevados e atingindo seus limites nos materiais usualmente utilizados, especialmente como é o caso dos risers de aço, que são elementos estruturais responsáveis por trazer a produção de óleo da árvore de natal, no fundo do mar, para as plataformas de produção.

Nestes casos, os aços vêm atingindo seu limite de resistência aos esforços mecânicos, ocasionando o surgimento de novos problemas de engenharia, como é o caso da busca de novos materiais que se apresentem como solução das questões, preferencialmente sem causar danos ao meio ambiente e que, apresente custos compatíveis.

Nesta busca, que passa naturalmente pelos materiais compósitos, os materiais com matriz cimentícia precisam ser lembrados e avaliados, especialmente em uma fase onde estes materiais vêm apresentando desenvolvimentos muito elevados, chegando a atingir resistências à compressão de até 800 MPa, como citado em DE LARRARD (1999), o que representa algumas vezes a resistência dos aços comuns, mantendo para isto uma densidade não superior a 2,6, enquanto o aço se mantém nos 7,85.

Dentro deste enfoque, o presente trabalho visa apresentar uma pesquisa em desenvolvimento no Laboratório de Concreto da Universidade Católica de Petrópolis (UCP), onde está sendo estudado o material denominado RPCM – Reactive Powdered Composite Materials, que se trata de um concreto de resistência à compressão bastante elevada, o RPC – Reactive Powdered Concrete, combinado com o posicionamento de folhas de fibras de carbono em seu interior, posicionadas no sentido das tensões trativas atuantes na peça.

Desta forma, este tipo de concreto armado tem a característica de apresentar resistências à compressão na ordem dos 200 MPa e resistência à tração também elevada. O material proposto, mantém a densidade mencionada anteriormente, um custo de produção bastante baixo se comparado ao aço e ainda, uma agressividade ambiental muito inferior ao aço, que é o material que se propõe substituir.

A pesquisa tem por principal objetivo demonstrar a viabilidade da utilização do RPCM na produção dos risers, desenvolvendo para tanto os concretos necessários e avaliando o resultado de ensaios em corpos de prova que possam simular os esforços necessários ao adequado comportamento destes tubos. Os ensaios buscam a obtenção de características mecânicas de resistência compatíveis com características solicitantes obtidas a partir de simulações numéricas, realizadas com o programa ANFLEX, aplicado a plataformas conhecidas e a condições reais de ondas.

No item seguinte, será apresentada uma breve história da evolução dos concretos, seguida por uma discussão das características conhecidas e daquelas esperadas no RPCM. Posteriormente, serão apresentados valores de solicitações principais obtidas no ANFLEX, os valores de características já alcançadas no laboratório e os principais ensaios que serão iniciados no próximo mês, viabilizados com a entrada em operação de equipamentos adquiridos por convênio da Universidade com a Petrobrás e o FINEP.

2 HISTÓRICO RESUMIDO DO CONCRETO CONVENCIONAL AO RPCM

O concreto, como sendo o resultado da mistura de ligantes e agregados, portanto um material compósito, é conhecido de longa data, tendo sido utilizados diversos materiais como ligantes, desde os óleos de baleia até o cimento portland – além de outros tipos de cimento, como os aluminosos e os micro-cimentos, por exemplo.

Na história mais recente, é importante lembrar que há cerca de 60 anos atrás o concreto habitualmente utilizado na construção civil, composto de cimento portland, areia e brita (rochas em pequenas dimensões – diâmetros da ordem de 20 mm em média) atingia resistência à compressão de cerca de 10 a 12 MPa. Já nos anos 70, as construções utilizavam concretos com resistência à compressão aos 28 dias da ordem de 15 a 18 MPa, representando ganho de resistência superior aos 50%.

Logo a seguir, nos anos 80 a 90, com o advento de aditivos superplastificantes e de outros aditivos químicos mais elaborados, os concretos começaram a atingir 30 MPa em condições normais e até valores superiores a 50 MPa em laboratórios e aplicações especiais, sendo este concretos denominados de concretos de alta resistência, inicialmente e, posteriormente, concretos de alto desempenho CAD, na medida que se percebe que não somente a resistência à compressão é elevada, mas de forma geral, todas as características do concreto são melhoradas.

Na virada para o século atual, os aditivos químicos tiveram novamente grande desenvolvimento e graças a produtos à base de policarboxilatos, entre outros, foi possível elevar a resistência à compressão dos concretos acima dos 100 MPa, já em aplicações comerciais, exigindo apenas ajustes nos agregados graúdos, uma vez que a resistência de rochas como os granitos e os basaltos foram ultrapassadas pela matriz cimentícia, tornando os agregados, o ponto fraco do material composto. Estes concretos, ainda denominados CAD, já no século XXI, passam a apresentar uma nova versão, onde a brita tradicional é então eliminada, os concretos recebem aumentos significativos no teor de cimento e todos os materiais finos, especialmente as sílicas, que passam a ser combinadas nas formas densificadas ou não, gerando os chamados RPC, ou concretos pós reativos, com resistências acima dos 100 MPa.

Bem recentemente, em laboratório, valores de até 800 MPa, já foram atingidos, como menciona GRAYBEAL (2007), alterando-se radicalmente os componentes do concreto convencional, onde as britas foram totalmente eliminadas, reduzindo praticamente a zero os vazios do material. Houve ainda a incorporação das fibras sintéticas em direções aleatórias, e sobretudo, a incorporação das sílicas ativas, densificadas, ou não, ocasionando ganho em todas as propriedades do concreto, como tem sido possível constatar no laboratório a cada dia, onde novas experiências são realizadas.

Nos últimos dois ou três anos, surge a incorporação de tecidos de fibras de carbono ao RPC, gerando o chamado RPCM com o objetivo de obter elevadas resistências à tração, sendo esta a única deficiência significativa do RPC como material para uso estrutural generalizado. Com este novo enfoque, surge um material de infinitas aplicações, que condensa elevadas vantagens em relação ao concreto convencional, ampliando de forma significativa o campo de aplicação dos compostos de matriz cimentícia.

O material objeto desta pesquisa, ou seja, a combinação do concreto com fibras de carbono, já apresenta experiência de aplicação semelhante, onde peças de concreto armado convencional, são reforçadas por camadas de folhas de fibras de carbono aplicadas externamente aos elementos estruturais, sendo as fibras posicionadas na direção das tensões tratativas. Naturalmente, elementos posicionados no interior das peças, possuem uma probabilidade muito mais elevada de apresentarem bom comportamento por não dependerem de sistemas de colagem que são o ponto de maior incerteza do processo.

3 REACTIVE POWDERED COMPOSITE MATERIALS (RPCM)

Conforme descrito acima, a tecnologia dos concretos apresentou um grande avanço nas últimas décadas, baseada especialmente no desenvolvimento da química, onde inúmeras possibilidades se abriram para o concreto através da viabilidade de acompanhamento detalhado de suas reações de hidratação. Esta facilidade, permitiu que a indústria da química dirigida a aplicações de concreto, pudesse interferir de forma segura na velocidade das reações, bem como, na obtenção de matrizes muito mais resistentes, tomando por base os mesmos cimentos já conhecidos do mercado ou a partir de cimentos especiais, desenvolvidos diretamente com o objetivo da obtenção de comportamentos mais elaborados.

Estas evoluções, da química aplicada à indústria do cimento e de aditivos especiais, permitiram todo o progresso descrito no item anterior, de forma a alcançar concretos especiais de resistências mecânicas comparáveis às do aço, considerado até então um dos materiais mais resistentes e adequados a aplicações estruturais da engenharia, oferecendo o RPC, no entanto, características extremamente vantajosas, como a mais importante de todas, o baixo peso específico (Densidade do aço = 7,85 – densidade aproximada dos RPC = 2,6).

Dentre estes avanços, o RPC (Reactive Powdered Concrete) é um micro concreto composto por cimentos do tipo Portland, ou similar, com função de aglomerante principal, as sílicas ativas, densificadas (superfície específica da ordem de 18 m²/g) e não densificadas (superfície específica da ordem de 40 m²/g), com função de fechamento da grade granulométrica e de aglomerantes com reações pozolânicas (posteriores), o metacaulim (também de elevada finura), as areias de quartzo com granulometria entre 0,15 e 0,5 mm – que constituem os agregados “graúdos” do concreto, a água em dosagens muito reduzidas (fator água/aglomerante ≤ 0,2), os aditivos, especialmente os hiperplastificantes, à base de cadeias de policarboxilatos modificados, com função de tornarem esta mistura auto nivelante (também auto adensável) e outros componentes, como as fibras sintéticas dispostas em posições aleatórias no interior da matriz, o pó de quartzo (peneiras #325 e #400) com função de obturação dos menores poros da matriz.

Este material, apresenta resistências à compressão a partir dos 100 MPa, tendo em alguns casos atingido até os 800 MPa, como citado em algumas publicações – ver GRAYBEAL (2007). Em nosso laboratório, está dominada a técnica de obtenção de resistências à compressão de 200 MPa. Juntamente com o ganho da resistência à compressão, o RPC apresenta melhoria em todas as propriedades dos concretos convencionais. A resistência à tração tem atingido valores acima dos 18 MPa em ensaios de prismas à flexão (sem fibras de carbono) e o módulo de elasticidade valores da ordem de 45 GPa – lembrando que o normal dos concretos está na casa dos 25 GPa. Em ensaios de prismas com uma camada de fibras de carbono saturada por pasta de cimento, preparados para ruptura à tração, permitiram a ruptura pelo rompimento da fibra de carbono com tensão de tração de 3250 MPa, como esperado.

A redução significativa da porosidade do RPC elimina características de permeabilidade que, em muitos casos, tornam o concreto um material vulnerável a ambientes de alta agressividade química, permitindo que estes concretos sejam resistentes a ambientes contaminados com altos teores de ácidos ou de sais. Também o RPC é um material que apresenta uma adequada estabilidade ao longo do tempo, como demonstrado em ROUSE et al (2007), onde a pequena quantidade de vazios (e suas reduzidas dimensões), bem como, a presença de fibras sintéticas posicionadas aleatoriamente no interior da matriz, fazem com que as deformações ocasionadas pela retração sejam reduzidas e distribuídas de forma uniforme, minimizando seus danos no material final. Estas deformações, relatadas no estudo

da tecnologia do concreto como deformações diferidas, têm sua importância bastante reduzida no RPC, como mostrado em ROUSE et al (2007), com base em experiências laboratoriais bastante extensas.

Outro fator que deve ser considerado fundamental nos RPC, é o baixo fator de contaminação ambiental relacionado à sua produção, onde, a fabricação do cimento e a extração de seus componentes agregados, como a areia, os componentes mais agressivos, ainda podem ser considerados em um nível bem inferior àqueles necessários à fabricação do aço e de outros materiais. A produção da sílica é resultante de um controle de poluição da produção do aço-silício e os aditivos representam uma parcela bem pequena no volume do material produzido.

A produção do RPC, diferentemente dos concretos convencionais, deve ser elaborada em ambiente onde o controle de volume ou peso dos componentes possa ser cuidadoso e preciso. Este cuidado tem por objetivo que a produção do material, tanto na fase de mistura como na fase de moldagem, possa passar por diversas etapas de controle de qualidade, exigindo a implantação de laboratório eficiente e capaz de acompanhar o desenvolvimento do material em todas as suas fases. Estas etapas, são indispensáveis na produção de elementos estruturais confiáveis e suficientemente seguros, conforme concebidos e projetados.

Também deve ser considerada a reduzida taxa de contaminação ao ambiente onde esteja inserido – ver HASSAN et al (2005). O RPC, tratando de um material livre da presença do aço, de forma geral, é um material inerte à natureza, pouco agressivo a animais, das mais variadas espécies, e que, em nada agride vegetações ou outros seres vivos.

Finalmente, deve ser considerado com muita atenção o custo de produção de volumes equivalentes do RPC e de aço, ou outros materiais que apresentam utilização equivalente na solução de problemas específicos da engenharia. O RPC, apresenta custo muito reduzido, da ordem de 7 a 10% daquele do aço, apesar de todos os cuidados que devem ser tomados na sua produção, onde o controle de qualidade deve ser muito maior do que aquele utilizado na produção dos concretos convencionais.

As fotos apresentadas na Figura 1 mostram o processo de fabricação do RPC no Laboratório de Concreto da UCP. Foram fabricados 163 lotes de corpos de prova, nos quais foram realizados ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral (ensaio brasileiro) e por flexão, determinação do módulo de deformação longitudinal, de permeabilidade e absorção de água e de homogeneidade dos elementos de concreto por ultra-som. Além disso, foram feitos ensaios não destrutivos com o objetivo de aferição por esclerometria e por cravação de pinos. Imagens de partes de concreto, resultante dos ensaios destrutivos, foram examinadas em microscópio convencional para observação quanto a existência de ar incorporado, da qualidade da mistura dos componentes em diversos traços e da estrutura de ligação entre os agregados e os materiais aglomerantes.

Definida a importância do RPC, que é a matriz do RPCM, surge o posicionamento das fibras de carbono, utilizadas em forma de folhas - fibras em uma direção, no interior da massa de RPC. As folhas são posicionadas na região onde o projeto demonstra a ocorrência de tensões de tração, sendo as fibras posicionadas nestas direções. As fibras de carbono, material com resistência à tração superior a 3000 MPa, obtido na forma comercial de tecido com fibras em uma (folha) ou duas direções ortogonais, é posicionado diretamente sobre uma primeira camada de matriz cimentícia fresca, recebendo imediatamente sobre o tecido nova camada de RPC, de forma que a pasta cimentícia percole entre as fibras garantindo uma continuidade no material, reduzindo problemas associados à aderência das fibras à matriz cimentícia.

No laboratório da UCP, placas têm sido construídas, eliminando dificuldades de produção, bem como, serão utilizadas para ensaios de tração por flexão, de forma que a

região da interface entre fibras e matriz cimentícia foi analisada cuidadosamente através de ultra-som, em um primeiro momento e por tomografia na fase seguinte dos ensaios.



Foto 3.1 – Material seco em processo de mistura para produção do RPC



Foto 3.2 – Material úmido em mistura.



Foto 3.3 – RPC sendo vertido em formas



Foto 3.4 – Corpo de prova de RPC sendo testado à compressão.

Figura 1. Processo de fabricação e teste do RPC em laboratório.

4 APLICAÇÕES DO RPCM

Os concretos de altíssima resistência, RPC, apresentam uma elevada gama de aplicações, seja no âmbito da engenharia civil, seja na engenharia mecânica, na engenharia

naval ou em diversas outras áreas, todas elas justificadas pela vantajosa relação de suas características mecânicas, químicas e econômicas. A sua combinação com as fibras de carbono, resultando no RPCM, é a complementação das características deste material que sempre foi uma das principais ferramentas da engenharia civil e que tende a ampliar sua aplicabilidade, especialmente na área das engenharias industriais, como a mecânica e a oceânica.

Na engenharia civil, a possibilidade de um material com as características do RPC são muito vantajosas na construção de elementos especiais, destinados a vãos especiais – observar relação de resistências mecânicas com densidade e módulo de elasticidade. Esta combinação, pode permitir a solução de problemas ainda considerados de difícil solução para o concreto convencional e que atualmente nos remete ao emprego de materiais mais nobres e caros, como o próprio concreto protendido e especialmente o aço, sendo em muitos casos os aços especiais, de produção custosa, seja no universo econômico como no de poluição ambiental.

A indústria do pré-fabricado, será aquela que mais proveito vai tirar deste material, uma vez que como mencionado, o mesmo exige um ambiente de cuidados produtivos mais elevados e de controle de qualidade cuidadoso, especialmente em função das elevadas tensões a que o mesmo será submetido, seja em construções de edifícios, galpões, tubulações, tanques para armazenagem de produtos agressivos, em estruturas expostas ao mar ou a águas contaminadas como embarcações e plataformas na indústria petrolífera.

Como visto, a indústria, de uma forma geral, usará quase que exclusivamente do aço, material ainda muito sensível a ataques de produtos químicos e ao ambiente, propriamente dito, poderá tirar enormes proveitos dos concretos especiais, os RPC, quando, combinados com “armações” em fibras, de vidro, de aramida, de carbono e mais futuramente de grafite, atingirá resistências elevadas, não somente à compressão, mas também à tração e a tensões cisalhantes, sendo este material composto, já em processo de pesquisas avançadas, inclusive no Laboratório de Concreto da Universidade Católica de Petrópolis, sendo conhecido no universo científico como RPCM (Reactive Powdered Composites Materials).

Em todas as possíveis aplicações, a idéia do concreto como material base deve ser levada em consideração, ou seja, todo o conhecimento acumulado ao longo de séculos deve ser utilizada, de forma que problemas específicos dos concretos não sejam relegados a segundo plano ocasionando o surgimento de surpresas desagradáveis na utilização deste “novo” tão velho material.

Tubos em RPCM foram moldados (três), incluindo uma camada de fibras de carbono, com diâmetro interno de 100 mm e externo de 200 mm (paredes de 50 mm), foram moldados com vedação das extremidades, foram expostos à câmara hiperbárica do CENPES, que simulou pressões equivalentes a uma lâmina de água de 3000 m. Esta simulação considerou a aplicação da pressão de forma lenta, equivalente à implantação de um tubo real a esta profundidade, permanecendo nesta condição por período superior a uma hora, sendo posteriormente despressurizado de forma lenta (1,5 horas para atingir a pressão máxima, mais 1,5 horas permanecendo nesta pressão máxima). Ao final da simulação foi possível observar a absoluta integridade dos tubos, bem como, após análise os tubos foram abertos, não sendo constatada a presença de água no interior dos mesmos, conforme mostra as fotos da Figura 2.



Foto 4.1 – Painel de controle de pressão do ensaio simulador do CENPES. .



Foto 4.2 – Interior do tubo após

Figura 2. O Ensaio na Câmara Hiperbárica do Cenpes/Petrobras.

5 ANÁLISE DE ESFORÇOS EM RISERS

A análise de esforços em risers, inicialmente tratou o elemento como um “simples” problema de um cabo em catenária, fixado em sua extremidade superior a uma placa (plataforma) na superfície do mar e com a outra ligada por atrito ao solo no fundo do mar, tendo sido considerada uma altura de lâmina de água da ordem de 3000 m. Para esta análise foi adotado um ângulo de saída da plataforma de 12 graus com a vertical, uma vez tratar-se de um ângulo pequeno para tubos de aço (considerados rígidos) e elevado para flexíveis (compósitos com matriz polimérica). Foi considerado que os tubos em RPCM são uma situação intermediária entre os dois tipos de risers. A Figura 3 mostra a modelagem de um riser fixado em uma plataforma de produção em 3000 m LDA.

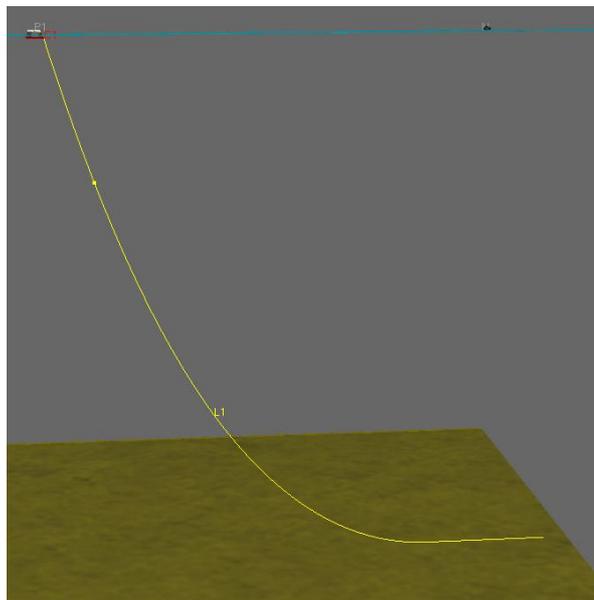


Figura 3. Modelagem de um riser de produção em catenária no programa ANFLEX

Esta análise, simplificada nos levou a valores de tração da ordem de 1380 kN (na região de conexão com a plataforma) para tubos com 150 mm de diâmetro externo e 100 mm de diâmetro interno em concreto, com um fluido interno de densidade igual a da água (ligeiramente a favor da segurança se compararmos com o óleo produzido, que tem, em média, densidade igual a 0,8) mostraram a viabilidade do uso do RPCM como material componente destes elementos. A alta espessura de parede deste riser deveu-se à necessidade de se equilibrar a catenária, uma vez que o RPCM tem densidade muito inferior ao do aço.

Posteriormente, utilizando o ANFLEX, fornecido pela Petrobrás para a presente pesquisa, que analisa o problema por elementos finitos, modelando o riser como um elemento de pórtico, considerando o ângulo de saída em 12 graus com a vertical, foram obtidos valores de tração no trecho superior do riser de 3000 kN para tubos com 100 mm de diâmetro interno e espessura de 1", produzidos em aço e tração de 1000 kN para tubos com 100 mm de diâmetro e espessura de 2" (5 cm) em RPCM, para mesmas condições de mar e 3000 m de lâmina de água. Nesta análise foi utilizada uma condição de mar compatível com ondas decenárias do Campo de Marlim, para a plataforma P-18, na Bacia de Campos, estendidas para uma lâmina d'água de 3000 m.

Uma opção para reduzir a espessura de parede do riser em RPCM é a colocação de tirantes no meio do vão da catenária, de modo a evitar que este tubo venha a flutuar. Esta solução também foi analisada no programa ANFLEX. A Figura 4 mostra a modelagem desta solução, que também se mostrou viável.

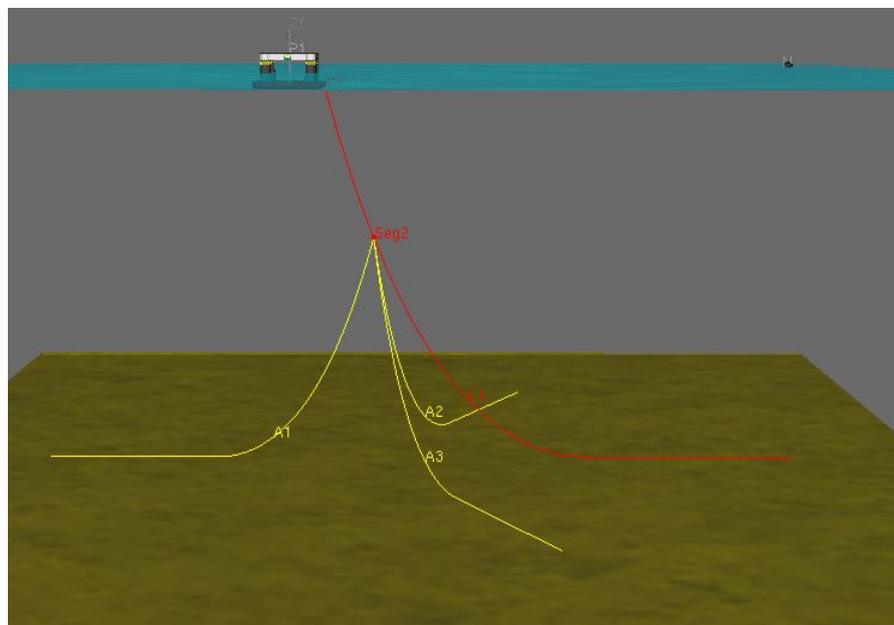


Figura 4. Modelagem de uma opção estabilizadora de um riser de produção em catenária feito de RPCM

Estas análises mostram as vantagens claras do uso do material RPCM como componente dos risers, especialmente no caso das grandes lâminas de água, onde a influência do peso do tubo apresenta influência nos esforços finais. Com base nesta análise, deve então ser considerado que a força de tração no ponto superior do riser, pode ainda ser minorada pela utilização de diversos recursos de engenharia (bóias especiais e outras formas de flutuadores parcialmente submersos), de forma que quando o riser é utilizado, a força máxima a ser considerada não deve ultrapassar 700 kN na tubulação. Mesmo para a força trativa máxima prevista (1000 kN), a tensão resultante deve ser considerada como bastante razoável para o material compósito proposto, ocasionando em um tubo com 100 mm de diâmetro interno e 5,0 cm de espessura, uma tensão trativa (área de 235,62 cm²) de 42,4 MPa, sendo possível atingir nestes concretos (RPC), valores da ordem de 20 MPa de resistência à tração. Esta defasagem, não deve ser considerada preocupante, uma vez que a mesma deverá ser integralmente suportada pelas folhas de fibras de carbono posicionadas no interior do tubo. Cada camada, para as dimensões consideradas (área de 0,065 cm²/camada), suporta forças de tração de 223 kN (adotado coeficiente de segurança de 1,67 para a fibra de carbono), ou seja, 5 camadas de folha de fibras de carbono são capazes de suportar integralmente os esforços de tração (desprezando-se a resistência do RPC) do riser em RPCM nas condições críticas descritas acima. A Figura 5 mostra a variação das trações no topo em relação à espessura de parede do RPCM. Destacamos, nesta figura, as espessuras de 1,5”, 2,0”, 2,5” e 3” em relação à espessura de 1”.

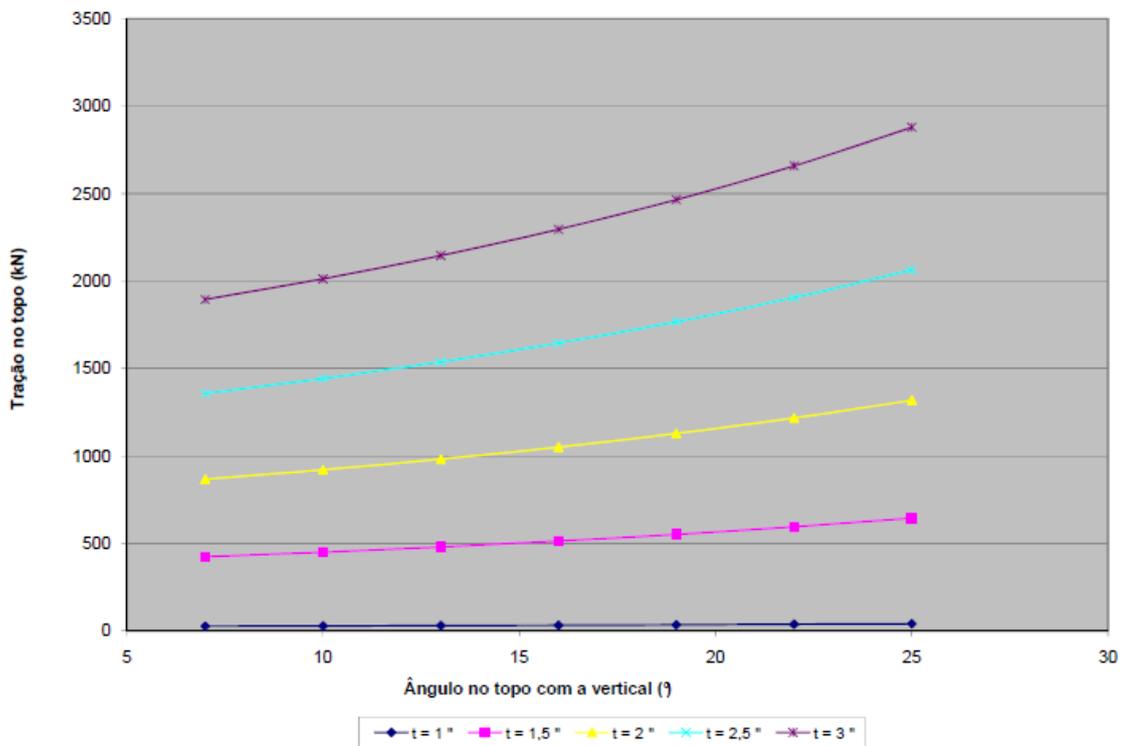


Fig. 5 – Curva de esforços gerada por modelagem de riser em RPCM a 3000 m de lâmina de água sob condições de ondas decenárias.

Uma avaliação conjunta dos materiais, controlando as deformações em não mais que 5/1000 – valor que pode ser considerado adequado para o RPC (Segurança de 1,75 sobre a deformação de ruptura) – permite concluir que a presença de 4 camadas de fibras de carbono no interior das paredes será suficiente para sustentar a integridade dos esforços (1 camada a menos do que o suporte apenas pela fibra, o que pode ser considerado válido em função da elevada resistência à tração do RPC). Esta conclusão é obtida mantendo-se coeficientes de segurança da ordem de 1,67 para ambos os materiais. Na realidade os coeficientes de segurança só devem ser definidos de forma conclusiva, após a elaboração de normas técnicas específicas, o que deve ser baseado em um número mais elevado de ensaios e experimentos.

Desta forma, o processo de fabricação torna-se bastante razoável, na medida em que o tubo pode ser fabricado por concreto projetado até o diâmetro necessário à implementação da primeira camada de fibra e por processos repetidos até a obtenção do diâmetro externo final. Quanto ao projeto de emenda entre os tubos, diversas possibilidades são disponíveis sem a utilização do aço, permitindo que os risers produzidos em RPCM sejam absolutamente isentos de corrosão.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou uma introdução ao conhecimento dos concretos de altíssima resistência, compostos com fibras de carbono, os RPCM, desenvolvidos de forma contínua e intensa ao longo de todo o mundo e particularmente no laboratório de concreto da Universidade Católica de Petrópolis. Foram apresentadas demonstrações de características já obtidas no laboratório, que confirmam valores indicados na bibliografia apresentada.

Como foi possível observar, o RPCM, concreto de altíssima resistência reforçado com fibras de carbono, é um material com uma grande amplitude de aplicabilidade, seja pela facilidade de sua produção, especialmente em ambiente industrial, seja pela sua elevada plasticidade, que permite que o material seja moldado nas mais variadas formas e ainda, pelas suas elevadas características físicas e mecânica, como elevadas resistências à compressão e à tração, módulo de elasticidade de valor intermediário, favorável aos efeitos das correntes marinhas e baixíssima permeabilidade, associadas a um peso específico da ordem de 30% do aço. Também o fator custo e potencial de contaminação ambiental, ambos muito reduzidos em comparação à maioria dos materiais, tende a viabilizar a aplicação do RPCM na produção de risers, entre outras infinitas aplicações, na medida em que problemas associados aos concretos convencionais podem ser considerados sanados em função das elevadas características que podem ser associadas ao material proposto.

As análises comparativas desenvolvidas inicialmente, que hoje se confirmam em resultados experimentais, indicam que os esforços que ocorrem durante as fases de implantação e de utilização dos risers, obtidos com base nos dados fornecidos pela Petrobrás através de análises com o ANFLEX, são perfeitamente compatíveis com o material proposto, o RPCM.

A aplicação do material na produção de risers, depende apenas do desenvolvimento de adequados projetos de engenharia, específicos para cada caso de aplicação, função da lâmina de água, das correntes em cada região, do tipo de plataforma a ser utilizado, entre outras variáveis, além de detalhamento de elementos de ligação e produção,

garantindo que os esforços sejam equivalentes às resistências e características do RPCM.

Após a constatação da viabilidade técnica pelos diversos argumentos apresentados, esta viabilidade foi comprovada na prática por tubos de dimensões reais – com as extremidades vedadas - expostos à câmara hiperbárica do CENPES que simulou pressões de uma lâmina de água de 3000 m, inclusive permanecendo com esta pressão durante período superior a uma hora, sem que nenhum dano fosse constatado no tubo.

Como vantagens adicionais geradas pelo material compósito de base cimentícia, com expressivo significado é custo reduzido de produção (da ordem de 10% do equivalente de aço) e a baixa agressividade ambiental, dois fatores de grande importância em qualquer análise de viabilidade de projetos de engenharia.

O presente trabalho, finalmente, teve por objetivo demonstrar as vantagens do RPCM, colocando-o como uma opção repleta de vantagens em aplicações diversas da engenharia, seja ela submarina, ou não. O trabalho tende a demonstrar que o RPCM, ainda tem uma vasta gama de características a serem determinadas, bem como, apresenta um grande universo de características a serem desenvolvidas, em função de necessidades que venham a ser apresentadas.

Trata-se, desta forma, de uma ferramenta com imensas capacidades e com um potencial que o coloca entre os materiais com maiores probabilidades de desenvolvimento em futuro próximo, dependendo para isto de continuadas pesquisas, que indicarão, de forma segura, todo o potencial previsto.

7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as seguintes organizações: FINEP/CTPETRO, pelo apoio e recursos à pesquisa, UCP pelas bolsas de iniciação científica aos alunos envolvidos e PETROBRAS/CENPES pelo suporte técnico e recursos.

8 REFERÊNCIAS

- Aitcin, P.C., 1998, “High Performance Concrete”, London.
- Bounneau, O., Poulin, C., Dugat, J., Richard, P., Aitcin, P.-C., 1996, “Reactive Powder Concrete: Theory to Practice”, Concrete International, EUA.
- Bulletin 14 FIB (Federation Interntionale du Concreto), 2001, Suíça.
- Colleparidi, S., Coppola, L., Troli, R., Colleparidi, M., 2005, “Mechanical Properties of Modified Reactive Powder Concrete” – ACI Materials Journal, EUA.
- De Larrard, F., 1999, “Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach”, Modern Concrete Technology Series, vol. 9, London.
- Graybeal, B.A., 2007, “Compressive Behavior of Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete”, ACI Materials Journal, EUA.
- Hassan, A., Kawakami, M., 2005, “Steel-Free Composite Slabs Made of Reactive Powder Materials and Fiber-Reinforced Concrete”, ACI Structures Journal, EUA.

- Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M.,2006, “Concrete, Structures, Properties and Materials” Berkeley, EUA.
- Neville, A.M., 1995, “Properties of Concrete”, EUA.
- Rossi, P.,2001, “Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concretes” Concrete International – FIB, Suécia.
- Rouse, J.M., Billington, S.L., 2007, “Creep and Shrinkage of High-Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composites”, ACI Materials Journal, EUA.
- Shaheen, E., Shrive, G., 2006, “Optimization os Mechanical Properties and Durability of Reactive Powder Concrete”, ACI Materials Journal, EUA.
- Shaheen, E.,Shrive, N.G., 2006, “Reactive Powder Concrete Anchorage for Post-Tensioning with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Tendons” , ACI Materials Journal, EUA.
- Washer, G., Fuchs, P., Graybeal, B., 2003 “Elastic Properties of Reactive Powder Concrete”, Anais do International Symposium of Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Alemanha.