



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Ciências e Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

- Mestrado - Doutorado

**AVALIAÇÃO DA ADERÊNCIA EM ESTRUTURAS TUBULARES
METÁLICAS REVESTIDAS COM MATERIAL CIMENTÍCIO SOB
ESFORÇOS ESTÁTICOS E DINÂMICOS**

por

Elisângela Pereira da Silva

Tese de Doutorado apresentada a Universidade Federal da Paraíba para
obtenção do título de Doutor.

João Pessoa-Paraíba

Março, 2010

ELISÂNGELA PEREIRA DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA ADERÊNCIA EM ESTRUTURAS TUBULARES
METÁLICAS REVESTIDAS COM MATERIAL CIMENTÍCIO SOB
ESFORÇOS ESTÁTICOS E DINÂMICOS**

Tese de Doutorado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica da
Universidade Federal da Paraíba em
cumprimento às exigências para
obtenção do Título de Doutor.

Orientador: Professor Dr. Sandro Marden Torres

João Pessoa - Paraíba

Março de 2010

S586a Silva, Elisângela Pereira da.

Avaliação da aderência em estruturas tubulares metálicas revestidas com material cimentício sob esforços estáticos e dinâmicos / Elisângela Pereira da Silva. - - João Pessoa: [s.n.], 2010.

118 f.: il.

Orientador: Sandro Marden Torres.

Tese (Doutorado) ã UFPB/CCEN.

*1.Engenharia mecânica. 2.Aderência. 3.Teste dinâmico .
4.Teste estático. 5.Poço de petróleo.*

UFPB/BC

CDU:621(043)

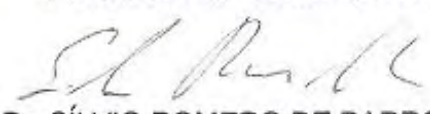
**AVALIAÇÃO DA ADERÊNCIA EM ESTRUTURAS TUBULARES METÁLICAS
REVESTIDAS COM MATERIAL CIMENTÍCIO SOB ESFORÇOS ESTÁTICOS E
DINÂMICOS**

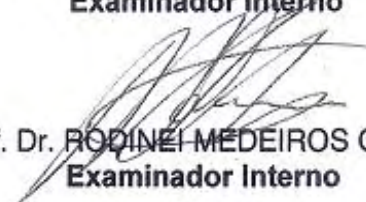
Por

Elisângela Pereira da Silva

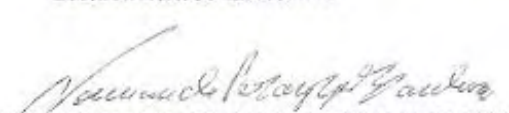
Tese aprovada em
26 de Março de 2010
Período letivo 2010.1


Prof. Dr. SANDRO MARDEN TORRES
Presidente da Comissão Examinadora e Orientador


Prof. Dr. SÍLVIO ROMERO DE BARROS
Examinador Interno


Prof. Dr. RODINEI MEDEIROS GOMES
Examinador Interno


Prof. Dr. JOSÉ WALLACE BARBOSA DO NASCIMENTO
Examinador Externo


Prof. Dr. NORMANDO PERAZZO BARBOSA
Examinador Externo

DEDICATÓRIA

A Deus pelo direcionamento e fortalecimento durante toda esta jornada.
Aos meus queridos pais Samuel e Elenilda.

AGRADECIMENTOS

A DEUS de todas as coisas, de tudo que nos cerca e de tudo que faz parte em nós.

Ao professor Sandro Marden Torres, pela valiosa orientação, empenho, dedicação, amizade, estímulo e pelas lições valiosas que levarei para a vida. Ao professor Sílvio Romero de Barros pela orientação e amizade e dedicação.

Ao professor Normando Perazzo Barbosa pela dedicação e orientação. Por quem tenho grande admiração, meu especial agradecimento.

Ao professor José Wallace Barbosa do Nascimento por ceder os equipamentos necessários para realização desse trabalho.

Ao Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas ã LABEME da UFPB, em especial aos funcionários, Sebastião, Ricardo, Zito, Delbi e Cláudio pela dedicação e presteza durante a realização da etapa experimental.

Ao CNPQ, pelo apoio financeiro.

Aos colegas de doutorado, Andressa, Marcilene, Júnior, Marília, Chris, Cibele e Valkisfran pela amizade e apoio emocional.

A todos que fazem o Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da UFPB.

Aos meus pais Samuel e Elenilda e aos meus irmãos Elissandro e Elen por todo apoio e pela amizade.

AVALIAÇÃO DA ADERÊNCIA EM ESTRUTURAS TUBULARES METÁLICAS REVESTIDA COM MATERIAL CIMENTÍCIO SOB ESFORÇOS ESTÁTICOS E DINÂMICOS

RESUMO

A aderência em estruturas tubulares metálicas revestidas com material cimentício, tais como, poço de petróleo é bastante complexa. Estes estão sujeitos a variação de temperatura, bombeamento, injeção de vapor, vibrações provocadas por cargas explosivas, que podem vir a prejudicar a interface do conjunto tubo-pasta de cimento, através da perda da aderência. Ensaio de arrancamento em laboratório são utilizados para verificação desta aderência. No entanto, esta técnica não contempla a vida útil da integridade estrutural do poço. O presente trabalho tem como objetivo contribuir para o aperfeiçoamento da técnica de verificação da aderência através de carregamento estático e dinâmico. Para isto, utilizou-se primeiro testes de arrancamento para verificação de uma melhor velocidade de aplicação de carga. Para isto utilizou-se tubos metálicos revestidos parcialmente por pasta de cimento. Simulou-se duas condições de contato: sem tratamento na superfície dos tubos, e com tratamento NaCl. Observou-se que a presença do NaCl e uma menor velocidade de aplicação de carga influenciaram de forma positiva a tensão de aderência. Para o ensaio dinâmico quase estático, através da contagem do número de ciclos, percebeu-se que a presença desta substância na interface apresentou um maior número de ciclos. Desta forma concluiu-se que esta técnica é viável para avaliação da vida útil do poço de petróleo.

Palavras Chaves: Aderência, Teste Dinâmico, Teste Estático, Poço de Petróleo.

EVALUATION OF BOND IN STRUCTURES TUBULAR METAL COATED WITH CEMENTITIOUS MATERIAL UNDER STATIC AND DYNAMIC STRESS

ABSTRACT

The bond on tubular steel coated with cementitious material, such as oil wells is quite complex. These are subject to change in temperature, pumping, steam injection, vibration caused by explosive charges, which can harm the interface of the tube cement paste through the loss of bond. Pullout tests in the laboratory are used for verification of the bond. However, this technique does not contemplate the life of the structural integrity of the well. This work aimed to contribute to the improvement of the technical verification of the bond through static and dynamic loading. For this, first using pullout tests has been proposed a study to test an improved speed of application loading. For this we used tubes coated partially of cement paste. Simulating the two contact conditions: no treatment on the surface of the tubes, and treatment with NaCl. It was observed that the presence of NaCl and a slower rate of load application positively influenced the bond stress. For the quasi-static dynamic test, by counting the number of cycles, it was felt that this substance in the interface showed a greater number of cycles. Thus it was concluded that this technique is feasible to evaluate the useful life of the well oil.

Keywords: Bond, Dynamic Test, Static Test, Oil Well.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	01
1.0 INTRODUÇÃO	01
1.2 OBJETIVOS	04
1.2.1 Objetivos específicos	04
CAPÍTULO II	05
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	05
2.1 Introdução	05
2.2 Estrutura de poços	06
2.3 Materiais cimentantes para poços de petróleo	09
2.3.1 Cimentação	13
2.3.1.1 Tipos de cimentação	14
2.3.2 Técnicas utilizadas para avaliação da qualidade da cimentação	14
2.3.3 Substâncias presentes em poços de petróleo no sistema revestimento metálico pasta de cimento	17
2.4 Adesão tubo-pasta de cimento	19
2.4.1 Estudos realizados para detecção de aderência em poços de petróleo	20
2.5 Ações cíclicas para análise de adesão	21
2.5.1 Dano cumulativo	23
2.6 Comportamento tensão-deformação	24
2.7 Natureza dos esforços dinâmicos atuantes no contato tubo metálico-pasta de cimento	26
A ã Bombeamento	26
B ã Canhoneio	28
C ã Injeção de vapor	29
2.8 Mecanismo de dissipação de energia	30

CAPÍTULO III	32
3.PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	32
3.1 Introdução	32
3.2 Ensaio estático	32
3.2.1 Materiais	35
3.2.1.1 Cimento	35
3.3 Metodologia	35
3.3.1 Ensaio Estático	35
3.3.1.1 Preparação dos corpos de prova	35
3.3.1.2 Condição de contato dos tubos	37
3.3.1.3 Preparação das pastas	38
3.3.1.4 Cura	39
3.3.1.5 Ensaio de aderência	40
<i>Tensão de aderência máxima</i>	41
3.3.2 Ensaio dinâmico	42
3.3.2.1 Preparação dos corpos de prova	45
3.3.2.2 Ensaio dinâmico	46
<i>Análise estatística</i>	48
CAPÍTULO IV	49
4.APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	49
4.1 Ensaio estático	49
4.1.2 Análise visual	49
4.2 Efeito da velocidade de aplicação de carga da condição de contato da relação (a/c) e da temperatura do sistema tubo-pasta de cimento na tensão de aderência	51
4.2.1 Temperatura ambiente	51
4.2.2 Temperatura 60 °C	57
<i>Análise estatística</i>	63
<i>Efeito da velocidade de aplicação da carga</i>	66
<i>Relação (a/c)</i>	66
<i>Condição de contato</i>	67
<i>Efeito da temperatura</i>	67
4.3 Efeito da condição de contato da relação (a/c) da idade da temperatura do sistema tubo-pasta de cimento na tensão de aderência	68

<i>Análise estatística.</i>	74
4.4. Estudo comparativo entre a primeira e segunda etapa	79
4.5 Ensaio Dinâmico	82
4.5.1 Análise Visual	82
4.5.2 Efeito da condição de contato e idade no carregamento cíclico	84
4.5.2.1 Condição de contato LS	84
4.5.2.2 Condição de contato NaCl	86
4.5.3 Relação entre força de aderência e a amplitude	89
4.5.4 Relação entre força de aderência e o número de ciclos	90
4.5.5 Variação da amplitude relativa do deslocamento na superfície da camada de revestimento	92
<i>Análise estatística</i>	97
CAPÍTULO V	100
CONCLUSÕES	100
Regime Estático	100
Regime Dinâmico	101
Sugestões para trabalhos futuros	102
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
ANEXOS	108

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 -Esquema de perfuração em diversas camadas com detalhe para o espaço anular e o revestimento metálico	07
Figura 2.2 Esquema básico com os tipos de revestimentos do poço. (adaptação THOMAS 2004)	07
Figura 2.3 Esquema de funcionamento da ferramenta CBL. (adaptada de MINEAR e GOODWIN, 1998)	15
Figura 2.4 Comportamento típicos tensão-deformação de pasta de cimento, agregado e concreto(a); Curva tensão-deformação do concreto (b)	25
Figura 2.5 Esquema para interface	26
Figura 2.6 Partes da bomba e ciclo de bombeio (THOMAS, 2004)	28
Figura 2.7 Vista superior de uma explosão por canhoneio	28
Figura 3.1 Planejamento experimental parte estática	33
Figura 3.2 (a)Materiais usados nos moldes (b) representação do ensaio estático	36
Figura 3.3. Colocação da pasta nos corpos de prova	38
Figura 3.4 Acondicionamento em caixa de poliestireno expandido	40
Figura 3.5 Representação do ensaio estático de aderência	41
Figura 3.6 Esquema para retirar a casca de cimento	42
Figura 3.7 Planejamento experimental parte dinâmica	44
Figura 3.8 Representação dos moldes para o ensaio cíclico	45
Figura 3.9 Geometria para o teste cíclico	46
Figura 3.10 (a). Representação do ensaio cíclico (b) Corpo de prova instrumentado na máquina de ensaio universal Shimadzu Servopulser	48
Figura 4.1 (a) Moldes para primeira e segunda etapa (b) corpo de prova antes do ensaio	49
Figura 4.2 Casca de cimento após o ensaio (a) comprimento (b) base	50
Figura 4.3 Superfície do tubo de aço após o ensaio com condição de contato LS e tubo	50

condição de contato óleo aos sete dias

Figura 4.4 Superfície do tubo de aço com condição de contato NaCl e com condição de contato óleo aos sete dias	51
Figura 4.5 Curva força versus deslocamento para velocidade 0,01 mm/s em temperatura ambiente. (a) relação (a/c) 0,44 (b) relação (a/c) 0,60	52
Figura 4.6 Curva força versus deslocamento para velocidade 0,1 mm/s em temperatura ambiente (a) relação (a/c) 0,44 (b) relação (a/c) 0,60	54
Figura 4.7 Curva força versus deslocamento para velocidade 1 mm/s em temperatura ambiente (a) relação (a/c) 0,44 (b) relação (a/c) 0,60	55
Figura 4.8 Velocidade de aplicação de carga versus relação (a/c) versus condição de contato a temperatura ambiente	57
Figura 4.9 Curva força versus deslocamento para velocidade 0,01 mm/s em temperatura de 60 °C. (a) relação (a/c) 0,44 (b) relação (a/c) 0,60	58
Figura 4.10 Curva força versus deslocamento para velocidade 0,1 mm/s em temperatura 60 °C. (a) relação (a/c) 0,44 (b) relação (a/c) 0,60	60
Figura 4.11 Curva força versus deslocamento para velocidade 1 mm/s em temperatura 60 °C (a) relação (a/c) 0,44 (b) relação (a/c) 0,60	61
Figura 4.12 Velocidade de aplicação de carga versus relação (a/c) versus condição de contato à temperatura 60 °C	63
Figura 4.13 Tensão de aderência em função da velocidade e da temperatura para a condição de contato LS (limpo e seco)	64
Figura 4.14 Tensão de aderência em função da velocidade e da temperatura para condição de contato NaCl (cloreto de sódio)	65
Figura 4.15 Condição de contato versus temperatura versus relação (a/c) para idade de 1 dia	70
Figura 4.16 Condição de contato versus temperatura versus relação (a/c) para idade de 3 dias	72
Figura 4.17 Condição de contato versus temperatura versus relação (a/c) para idade de 7 dias	74
Figura 4.18 Tensão de aderência em função da idade e da temperatura para a condição de contato óleo e relação (a/c) 0,33	75
Figura 4.19 Tensão de aderência em função da idade e da temperatura para condição de contato LS (limpo e seco) e relação (a/c) 0,33	76

Figura 4.20 Tensão de aderência em função da idade e da temperatura para condição de contato NaCl e relação (a/c) 0,33	76
Figura 4.21 Tensão de aderência em função da idade e da temperatura para condição de contato óleo e relação (a/c) 0,44	77
Figura 4.22 Tensão de aderência em função da idade e da temperatura para condição de contato LS (limpo e seco) e relação (a/c) 0,44	77
Figura 4.23 Tensão de aderência em função da idade e da temperatura para condição de contato NaCl e relação (a/c) 0,44	78
Figura 4.24 Tensão de aderência em função do modo de mistura	80
Figura 4.25 (a) corpo de prova antes do ensaio. (b) pós ensaio cíclico	83
Figura 4.26 Apresentação da fissura	83
Figura 4.27 Parte da casca de cimento com condição de contato LS e condição de contato NaCl	84
Figura 4.28 Número de ciclos versus amplitude relativa do tubo de aço	85
Figura 4.29 Número de ciclos versus amplitude relativa pasta de cimento para condição de contato LS (limpo e seco)	86
Figura 4.30 Número de ciclos versus amplitude relativa do tubo de aço	87
Figura 4.31 Número de ciclos versus amplitude relativa pasta de cimento para condição de contato NaCl (cloreto de sódio)	88
Figura 4.32 Resumo para o ensaio cíclico	89
Figura 4.33 Amplitude relativa em relação a força de aderência.	90
Figura 4.34 Número de ciclos elásticos em relação a força de aderência	91
Figura 4.35 Número de ciclos após dano com relação a força de aderência	92
Figura 4.36 Número de ciclos versus decremento logarítmico para condição de contato LS para um dia	93
Figura 4.37 Número de ciclos versus decremento logarítmico para condição de contato NaCl para um dia	93
Figura 4.38 Número de ciclos versus decremento logarítmico para ensaio com condição de contato LS aos três dias	94
Figura 4.39 Número de ciclos versus decremento logarítmico para ensaio com condição de contato NaCl aos três dias	95
Figura 4.40 Número de ciclos versus decremento logarítmico para ensaio com condição de contato LS aos sete dias	96

Figura 4.41 Número de ciclos versus decremento logarítmico para ensaio com condição de contato NaCl aos sete dias

96

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Equivalencia entre os cimentos americanos e brasileiros (METHA E MONTERIRO, 2008)	11
Tabela 2.2 Correspondencia entre os cimentos ASTM, NBR e API	12
Tabela 3.1 Parâmetros avaliados na pesquisa	34
Tabela 4.1 Resumo da tensão de aderência a temperatura ambiente	56
Tabela 4.2 Resumo da tensão de aderência a temperatura de cura controlada 60 °C	62
Tabela 4.3 Resumo da tensão de aderência para idade de 1 dia	69
Tabela 4.4 Resumo da tensão de aderência para idade de 3 dias	71
Tabela 4.5 Resumo da tensão de aderência para idade de 7 dias	73
Tabela 4.6 Resumo para condição de contato LS	85
Tabela 4.7 Resumo para condição de contato NaCl	87

CAPÍTULO I

1.0 INTRODUÇÃO

Os combustíveis derivados do petróleo e o gás natural respondem por cerca de 30% da atual demanda energética do Brasil, sendo a fonte predominante do setor de transporte, no qual representam quase 90% do consumo. Embora a produção de petróleo pela Petrobrás tenha sido crescente, alcançando em 2009 a média de 2,525 milhões de barris de petróleo no Brasil e no exterior, representando um incremento de 5,2% sobre a média de 2008 (JÚNIOR, 2010), o petróleo ainda é uma fonte de dependência externa da matriz energética. Segundo dados da (ANP, 2009), em 2008 o Brasil importou 149,208 mil barris de petróleo contra 169,242 mil barris em 1999. Há pois necessidade do crescimento de produção nacional e conseqüentemente a pesquisa no campo da exploração de poços tem que continuar avançando.

Poços de petróleo são estruturas tubulares revestidas com materiais cimentícios. Nessas estruturas, a qualidade do contato, ou seja, da adesão entre o aço e o material cimentício, é responsável por garantir a eficiência, tanto do ponto de vista mecânico quanto da estabilidade termodinâmica dos aços o que garante a sua proteção contra o fenômeno deletério da corrosão. Neste sentido, estudos sistemáticos são necessários para atender as demandas modernas da engenharia que têm requerido das estruturas novas e arrojadas aplicações, como em túneis submersos, pontes, e edifícios de alturas cada vez mais elevadas, como também, poços de petróleo extremamente profundos, como, por exemplo, os reservatórios do pré-sal brasileiros, cuja profundidade alcança até cerca de 8000 m.

Poços de petróleo com essas profundidades ficam sujeitos a exposições extremamente agressivas, por exemplo, pressões elevadas, concentrações de espécies iônicas bastante agressivas aos materiais constituintes da estrutura do poço, elevadas temperaturas, movimentações excessivas de camadas salinas de elevada fluência. Todas elas submetem a

estrutura do poço a condições cada vez mais extremas que podem alterar sua vida útil e sua integridade quando comparadas a regiões mais superficiais onde as condições são menos agressivas. Esta busca por jazidas cada vez mais profundas se dá pela dependência da sociedade moderna dos combustíveis fósseis.

A construção de poços é indispensável para permitir a exploração de reservatórios, contendo petróleo. Entre os procedimentos utilizados na sua construção, a cimentação é um dos mais importantes. Esta operação é realizada para promover o isolamento completo e permanente de zonas produtoras, localizadas atrás do revestimento, uma vez que a comunicação entre zonas produtoras de petróleo e zonas produtoras de gás e água é indesejável, por estar relacionada a contaminação de aquíferos ou com a produção descontrolada de gás pelo anular.

Durante a exploração destes poços existem diversos problemas que afetam a integridade estrutural destes sistemas de proteção, e conseqüentemente sua servicibilidade. Os cimentos utilizados para cimentação estão sujeitos a ataques químicos, como os agentes ácidos existentes na própria formação geológica, ou oriundos do processo de perfuração e extração (NÓBREGA, 2005). A agressividade dos ambientes ácidos se dá pela desestabilidade termodinâmica das fases hidratadas do cimento Portland, responsáveis pela resistência mecânica das matrizes (TAYLOR, 1990).

Uma parte crítica para integridade estrutural dos sistemas de proteção de poços de petróleo é a zona de transição entre o sistema tubo pasta de cimento. Mesmo com toda tecnologia desenvolvida para tornar o conjunto tubo-pasta de cimento resistente a ataques, sua deterioração surge do processo de operação do poço, que envolve variações de pressão e de temperatura, ocasionando na interface do conjunto, perda de aderência (CARPENTER, BRADY e BLOUNT, 1992).

As técnicas que avaliam a integridade da interface tubo-pasta de cimento são baseadas na propagação de ondas em meios elásticos, como é o caso dos perfis sônicos e ultra-sônicos. Dentre os parâmetros comumente avaliados, destaca-se a redução da amplitude da onda de propagação, que é proporcional à qualidade da cimentação, conhecida como Cement Bond Log (CBL) e Variable Density Log (VDL) (ECONOMIDES, WATTERS e DUNN-NORMAN (1997)). Esses testes apenas qualificam a cimentação, ou seja, fornecem através da amplitude de sinais, uma idéia da qualidade da cimentação nessa região.

ECONOMIDES, WATTERS e DUNN-NORMAN (1997) afirmam que nenhuma técnica acústica atual avalia diretamente a medida da presença ou ausência de cimento por trás do revestimento. Com base nisto a proposta de desenvolver técnicas que forneçam informações mais precisas, tanto qualitativas, como quantitativas das condições da região tubo pasta de cimento, é bastante viável.

CARTER e EVANS (1964) observaram a importância da realização de estudos mais precisos nessa região de contato e realizaram testes em laboratório para verificação da tensão de aderência entre tubos metálicos e o anel de cimento. Técnica esta, que até hoje é utilizado como parâmetro para detecção da tensão de aderência tubo-pasta de cimento em poços de petróleo.

Segundo FREITAS (2007) atualmente, é utilizada uma metodologia de ensaio que consiste em mensurar a resistência ao cisalhamento entre um tubo de aço e a pasta de cimento. Essa metodologia não esta padronizada pela API (American Petroleum Institute) e consiste basicamente de dois tubos jateados com areia e de comprimento 152,40 mm, um interno com diâmetro externo de 26,99 mm e outro externo com diâmetro interno 76,22 mm, onde o espaço anular entre eles é preenchido com pasta de cimento. Após a cura, é aplicada uma carga no tubo interno (no sentido longitudinal) e apóia-se a bainha de cimento de forma a permitir somente a passagem do tubo interno. Desta forma é medida a força necessária para romper a interface entre o tubo interno e o cimento.

Essa técnica avalia a aderência de forma destrutiva através de testes de arrancamento. Aqui tem-se a proposta de investigar a aderência em um regime ainda elástico. Ela é vantajosa, pois é feita, através da contagem de ciclos. Mede-se o número de ciclos antes da perda de aderência e a partir do momento em que se começa a perde-la . A técnica proposta através de carregamento cíclico além de avaliar a aderência pode indicar a vida útil do poço.

1.2 OBJETIVOS

O principal objetivo da presente pesquisa consiste em contribuir para o aperfeiçoamento de técnicas laboratoriais de verificação das condições da aderência tubo-pasta de cimento, através da aplicação carregamento estático e carregamento dinâmico.

1.2.1 Objetivos específicos

- Ç Avaliar o efeito da velocidade de aplicação da carga na aderência;
- Ç Verificar o efeito da relação (água/cimento) da pasta na aderência;
- Ç Estudar o efeito da condição de contato superficial do tubo na aderência;
- Ç Verificar o efeito da idade do revestimento cimentício e da temperatura na aderência;
- Ç Identificar a perda de aderência através de um processo dinâmico, no qual se mede a transferência de energia pela contagem do número de ciclos variando-se a condição de contato e a idade do ensaio.

CAPÍTULO II

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

O interesse econômico pelo petróleo teve início no começo do século XIX, ao ser utilizado como fonte de energia, substituindo o carvão vegetal que perdurou até a chegada da energia elétrica. No final do século XIX e início do século XX, a partir da invenção dos motores a gasolina e a diesel, cresceu a demanda por aquele produto e desde então o petróleo passou a ser explorado intensamente (THOMAS, 2004)

O petróleo é a principal matéria-prima energética e industrial do planeta. No entanto é uma riqueza distribuída de forma desigual entre os países e um recurso não renovável. Ele tem se tornado a mais importante substância negociada entre países e corporações, e tem sido a partir do século XX um fator político importante e causador de crises entre governos e mesmo guerras.

No ano de 2007, o governo brasileiro anunciou a descoberta de um novo campo de exploração petrolífera na chamada camada pré-sal, que se estende do Espírito Santo até Santa Catarina e a 300 km da costa. Estas reservas estão armazenadas a oito mil metros abaixo do nível do mar, dos quais dois mil metros são compostos por uma camada de sal. Estima-se que a reserva seja de cinco a oito bilhões de barris de petróleo. Segundo NETO e COSTA, (2007) se estas estimativas estiverem corretas, essa nova fonte de exploração será capaz de dobrar o volume de produção de óleo e gás no Brasil.

2.2 Estrutura de poços

A construção de um poço de petróleo, passa por duas fases: fase de perfuração e a completção (conjunto de operações destinadas a equipar o poço para produzir hidrocarbonetos, ou ainda injetar flúidos nos reservatórios).

O poço de petróleo é perfurado em fases, cujo número depende das características das zonas a serem perfuradas e da profundidade final prevista. A perfuração retira a rocha e cria uma pressão no sentido do desmoronamento da formação. Para atingir a profundidade necessária, o furo deve atravessar diversas camadas de solo. A perfuração segue uma sequência que vai desde a abertura do furo, através de fluidos de brocas de perfuração, até o preenchimento com pasta de cimento do espaço anular entre o furo e a coluna de revestimento, conforme Figura 2.1.

O espaço anular compreende o espaço entre a coluna de revestimento e a formação geológica adjacente, devendo ser preenchido por uma pasta de cimento para garantir a segurança do poço. Para alcançar este objetivo uma vedação deve ser feita entre o revestimento e a pasta de cimento e entre esta e as formações rochosas adjacentes, evitando também a formação de canais de fluidos na bainha de cimento (NELSON, 1990). No entanto, devido às várias formas com que a água se apresenta na pasta endurecida, aquela presente nos poros de diâmetro $> 50 \text{ nm}$ ($0,05 \text{ }\mu\text{m}$), é considerada como água livre, uma vez que sua remoção não causa qualquer variação de volume (METHA e MONTEIRO, 2008). A água livre pode migrar para a região de contato, e prejudicar a ligação entre a pasta de cimento e o revestimento metálico, enfraquecendo-a. É sabido também que nos materiais sólidos há uma relação inversa entre porosidade e resistência, consequentemente, os vazios são prejudiciais à resistência. A água presente nos vazios muito finos afeta a resistência uma vez que quando removida sob determinadas condições, pode contribuir para retração por secagem.

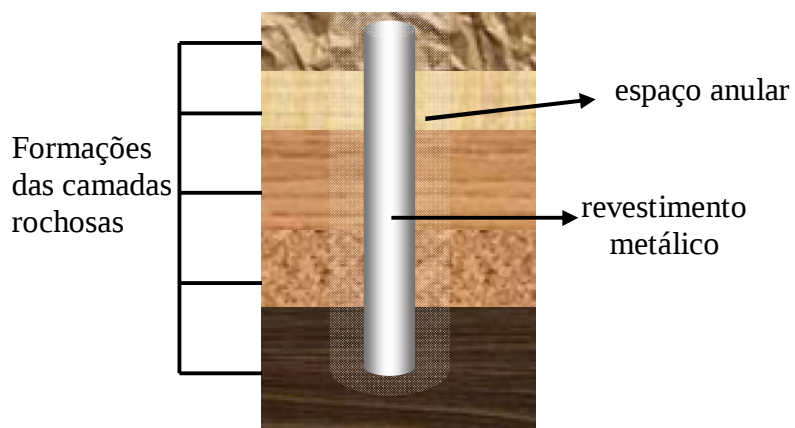


Figura 2.1 -Esquema de perfuração em diversas camadas com detalhe para o espaço anular e o revestimento metálico (adaptação THOMAS 2004).

A primeira das tarefas de completação é o revestimento do poço com diversos tubos. Os poços são compostos basicamente de tubos metálicos dispostos em diversas camadas, variando de acordo com as condições da rocha e a profundidade que atinge. Na Figura 2.2, apresenta-se um esquema básico em que se verificam os tipos de revestimentos presentes no poço.

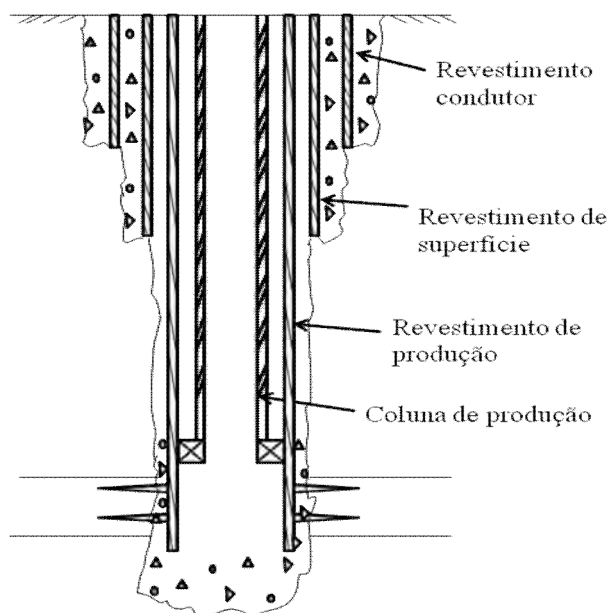


Figura 2.2 Esquema básico com os tipos de revestimentos do poço. (adaptação THOMAS 2004).

O revestimento condutor é o primeiro revestimento do poço, assentado a pequenas profundidades (10 m a 15 m), com diâmetros usuais de 30", 20" e 13 3/8". Tem como finalidade sustentar sedimentos não consolidados e isolar zonas de água doce.

O revestimento de superfície tem comprimento variando de 100 m a 600 m, com diâmetros usuais de 20", 18 5/8" e 13 3/8". Tem como finalidade isolar zonas de água doce, servir de base para a instalação de equipamentos de superfície e suportar outras colunas de revestimento. Sua principal característica é a cimentação em toda sua extensão, tendo função estrutural.

O terceiro é o revestimento de produção; possui uma faixa de comprimento variando de 1000 m a 4000 m; com diâmetros usuais de 13 3/8", 10 3/4" e 9 5/8". Possui as funções: isolar e proteger zonas de altas ou baixas pressões; isolar zonas de perda de circulação e isolar formações portadoras de fluidos corrosivos ou contaminantes de lama. É cimentado somente na parte inferior ou, em alguns casos, em um trecho intermediário adicional, sendo sustentado na superfície por cunhas apropriadas, apoiados no sistema da cabeça do poço.

O principal revestimento metálico presente no poço é o produtor. Este tem função de isolar o reservatório de fluidos indesejáveis presente na formação e em outras zonas que compõem o poço e como o próprio nome sugere, permite que ocorra a retirada do óleo ou gás da jazida.

A completação tem reflexos em toda vida produtora do poço e envolve altos custos, fazendo-se necessário um planejamento criterioso das operações e uma análise econômica cuidadosa.

Na completação (conjunto de operações destinadas a equipar o poço para produzir óleo ou gás), uma das operações muito importante para a construção de um poço de petróleo é a cimentação do anular formado entre o revestimento e a parede do poço. Para que esta operação seja bem sucedida, a lama (fluido de perfuração) deve ser completamente removido do anular pela pasta de cimento, que é bombeada para dentro do anular por dentro do próprio revestimento (THOMAS, 2004; JÚNIOR, 2008).

Pesquisas são realizadas com objetivo de tornar o anel de cimento mais resistente a ataques e a possíveis danos causados por solicitações externas. Pastas de cimento mais resistentes são alternativas para tentar aperfeiçoar mais ainda a produção nos poços petrolíferos. Adições poliméricas (biopolímero, geopolímero, polímeros e poliuretano) empregadas nas pastas com objetivo de aumentar a sua resistência, foram analisadas

(MARINHO 2004; BEZERRA, 2006; LIMA 2006; NASCIMENTO, 2006 FREITAS 2007; PINTO, 2007).

2.3 Materiais cimentantes para poços de petróleo

Os cimentos são essencialmente produzidos a partir de uma mistura de calcário e argila. O cimento Portland, fundamental para a construção civil, resulta da moagem de um produto chamado clínquer, obtido pelo cozimento até fusão incipiente da mistura de calcário e argila convenientemente dosado e homogeneizado, à qual é adicionada pequena quantidade de gesso (sulfato de cálcio). Os componentes químicos principais do cimento são a cal (CaO a 67%), a sílica (SiO_2 a 25%), a alumina (Al_2O_3 a 8%) e o óxido de ferro (Fe_2O_3 a 6%). Desses quatro componentes principais, designados pela química do cimento pelas letras C, S, A e F respectivamente, derivam compostos fundamentais mais complexos que determinam as propriedades do cimento. São eles o aluminato tricálcico (C_3A), controlando a pega inicial e o tempo de endurecimento da pasta, o ferro-aluminato tricalcico (C_4AF) componente que dá coloração cinza ao cimento devido a presença de ferro, controlando a resistência à corrosão química do cimento, o silicato tricálcico (C_3S), principal componente do cimento, responsável pela sua resistência mecânica inicial e o silicato dicalcico (C_2S) que contribui para o aumento da resistência do cimento a longo prazo METHA e MONTEIRO, (2008).

Segundo o METHA e MONTEIRO (2008) aproximadamente 5% do total do cimento Portland produzido nos Estados Unidos é consumido pelas indústrias de petróleo. Visto que as condições às quais os cimentos são expostos podem diferir radicalmente daquelas experimentadas na construção civil (CULVER et al 2004 apud API 2000), classificou os cimentos Portland em 8 classes designadas de A a H, em função da composição química, que deve estar de acordo com a profundidade, pressões e temperaturas aos quais estão expostas (CULVER, 2004).

- Classe A: Para usos em poços de até 6.000 pés (1.830 m), quando não são requeridas propriedades especiais. Corresponde ao cimento Portland comum.

- Classe B: Para poços de até 6.000 pés, quando é requerida moderada a alta resistência aos sulfatos.
- Classe C: Para poços de até 6.000 pés, quando é requerida alta resistência inicial, apresentando alta resistência aos sulfatos.
- Classe D: Para uso em poços de 6.000 pés até 10.000 pés (3.050 m), sob condições de temperatura moderadamente elevadas e altas pressões, apresentando alta resistência aos sulfatos.
- Classe E: Para profundidades entre 6.000 pés e 14.000 pés (4.270 m), sob condições de pressão e temperaturas elevadas, apresentando também alta resistência aos sulfatos.
- Classe F: Para profundidades entre 10.000 pés e 16.000 pés (4.880 m), sob condições de pressão e temperaturas elevadas, apresentando também alta resistência aos sulfatos.
- Classe G e H: Para utilização sem aditivos até profundidade de 8.000 pés (2.440 m). Como tem composição compatível com aditivos aceleradores e retardadores de pega, podem ser usados praticamente em todas as condições previstas para os cimentos das classes A até E. Por isso, são as classes mais utilizadas atualmente na indústria do petróleo, inclusive no Brasil.

A Tabela 2.1 apresenta os diversos tipos de cimento Portland normalizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e sua equivalência pela American Society for Testing and Materials (ASTM).

Tabela 2.1 Equivalencia entre os cimentos americanos e brasileiros (METHA E MONTERIRO, 2008).

Denominação Americana	Sigla	Norma ASTM	Denominação Brasileira	Sigla	Norma ABNT
Portland	I	C 150	Portland Comum	CPI	5732
-	-	-	Portland comum com adição	CPI-S	5732
Slang-Modified Portland	I (SM)	C 595	Portland Composto com Escória	CP II-E	11578
Pozzolan-Modified Pozzolann	I (MP)	C 595	Portland Composto com Pozolana	CP II-Z	11578
-	-	-	Portland Composto com Fíler	CP II-F	11578
Portland Blast-Furnace Slang	IS	C 595	Portland de Alto-Forno	CP III	5735
Portland Pozzolan	IP	C 595	Portland Pozolânico	CP IV	5736
Portland with High Early Strength	III	C 150	Portland com Alta Resistência inicial	CPV-ARI	5733
Portland with Moderate Sulfate Resistance	II	C 150	Portland resistente aos sulfatos	CPI RS	5737
Portland with High Sulfate Resistance	V	C 150	Portland resistente aos sulfatos	CPI RS	5737
Slang Modified Portland-Moderate Sulphate Resistance	I (SM) MS	C595	Portland resistente aos sulfatos	CPII-ERS	5737
Pozzolan-Modified Portland- Moderate Sulphate Resistance	I (MP) MS	C595	Portland resistente aos sulfatos	CPII-ZRS	5737
-	-	-	Portland resistente aos sulfatos	CPII-FRS	5737
Portland Blastfurnace Slang-Moderate Sulfate Resistance	IS (MS)	C595	Portland resistente aos sulfatos	CPIII RS	5737
Portland Pozzolan- Moderate Sulphate Resistance	IP (MS)	C595	Portland resistente a sulfatos	CPIV RS	5737

A diferença entre os cimentos de uso geral e os destinados à cimentação de poços de petróleo está associada ao controle adotado no processo de fabricação e aos teores dos quatro componentes básicos do cimento Portland anidro, a saber, C_2S , C_3S , C_3A e C_4AF . Observa-se que as classes de cimento Portland especificadas pela API não se referem a cimentos diferentes dos especificados pelas normas americanas ou brasileiras. Alguns desses cimentos, inclusive, se enquadram nas classes API. A Tabela 2.2 especifica algumas correspondências existentes entre cimentos brasileiros e americanos (THOMAS 2004).

Tabela 2.2.

Tabela 2.2 Correspondencia entre os cimentos ASTM, NBR e API.

Tipo ASTM	Tipo NBR	Classe API correspondente
I	CPI	A
-	CPI-S	A
IA	-	A
II	CPI-RS	B
IIA	-	B
V	CPI-S RS	-
I(SM)	CPII-E	-
I(MP)	CPII-Z	-
-	CPII-F	-
I(SM) RS	CPII-E RS	-
I(MP) RS	CPII-Z RS	-
-	CPII-F RS	-
IS	CPIII	-
IS (MS)	CPIII- RS	-
IP	CPIV	-
IP (MS)	CPIV-RS	-
III	CPV-ARI	C
IIIA	-	C

Alguns dos cimentos que não apresentam correspondência com as classes da API podem ser enquadrados nas mesmas, desde que ensaios de caracterização sejam realizados e atendam às exigências de norma. Por exemplo: é bastante provável que o CPIV ã RS brasileiro equivalente ao IP (MS) americano, possa se enquadrar na classe G da API, pois este cimento apresenta alta quantidade de pozolana, baixo teor de C_3A e alta resistência a sulfatos. Evidentemente, os ensaios da API devem ser realizados para se verificar a correspondência entre os dois tipos e a classe API correspondente (BEZERRA, 2006).

2.3.1 Cimentação

A cimentação de um poço de petróleo pode ser definida como a operação realizada para efetuar o bombeio de uma pasta de cimento, que irá preencher o espaço anular constituído entre a formação perfurada e o revestimento metálico, constituindo o que se denomina de bainha (RAVI e MORAN, 1998). A bainha é responsável pela estabilidade mecânica, bem como o isolamento entre as zonas produtoras de óleo e as formações ao redor da mesma. A pasta de cimento desce ao poço no estado fresco e gradativamente adquire consistência em função dos processos de hidratação. (NELSON, 1990; LÉCOLIER, RIVEREAU e AUDIBERT-HAYET, 2007).

Após o endurecimento a pasta de cimento apresenta adequada resistência à compressão. No entanto, o poço apresenta ciclagens térmicas e esforços mecânicos e a bainha de cimento apresenta limitada resistência à tração e baixa capacidade de deformação elasto-plástica (NELSON, 1990; METHA e MONTEIRO, 2008). O processo de fissuração que se manifesta por conta dessas últimas propriedades, pode levar ao comprometimento de sua função de estanqueidade e a bainha fica suscetível à passagem de fluidos.

A fratura da bainha resulta ainda na possibilidade de perda de produção de óleo e de gás pela região do anular, com conseqüências negativas do ponto de vista ambiental e econômico (NELSON, 1990).

2.3.1.1 Tipos de cimentação

Existem dois processos de cimentação: a primária e a secundária. Denomina-se cimentação primária a cimentação de cada coluna de revestimento, sendo a pasta de cimento colocado no espaço anular existente entre o revestimento metálico e a formação rochosa, de modo a se obter a fixação e vedação eficiente e permanente do anular.

As operações de cimentação secundária são todas as operações de cimentação realizadas no poço após a execução da cimentação primária. Geralmente essas operações são realizadas para corrigir deficiências resultantes de uma operação de cimentação primária mal sucedida.

Se a correção da cimentação primária for realizada sem o devido isolamento hidráulico entre as formações permeáveis, podem ocorrer os seguintes problemas:

- a) Produção de fluidos indesejáveis devido a proximidade dos contatos óleo/água ou gás/óleo;
- b) Testes incorretos de avaliação das formações;
- c) Prejuízo no controle do reservatório (produção, injeção de vapor) e
- d) Operações de estimulação mal sucedidas, com possibilidade inclusive de perda do poço.

O trabalho de cimentação é uma das últimas operações durante a completação e tem um grande impacto sobre a produtividade do poço. Uma avaliação de seu estado se faz necessária para confirmar o êxito de sua aplicação e sua capacidade de satisfazer os objetivos.

2.3.2 Técnicas utilizadas para avaliação da qualidade da cimentação

Para avaliar a qualidade da cimentação usam-se perfis acústicos que permitem avaliar a aderência da pasta de cimento ao revestimento e à formação, estas são relacionadas com os conceitos de propagação, formas e tipos de ondas. O método sônico para avaliação da qualidade da cimentação foi primeiramente proposto por GROSMANGIN, KPKESH e MAJANI (1961).

Esta técnica é conhecida como CBL (Cement Bond Log) e é a principal ferramenta utilizada atualmente. Na Figura 2.3 vê-se o esquema dessa técnica.

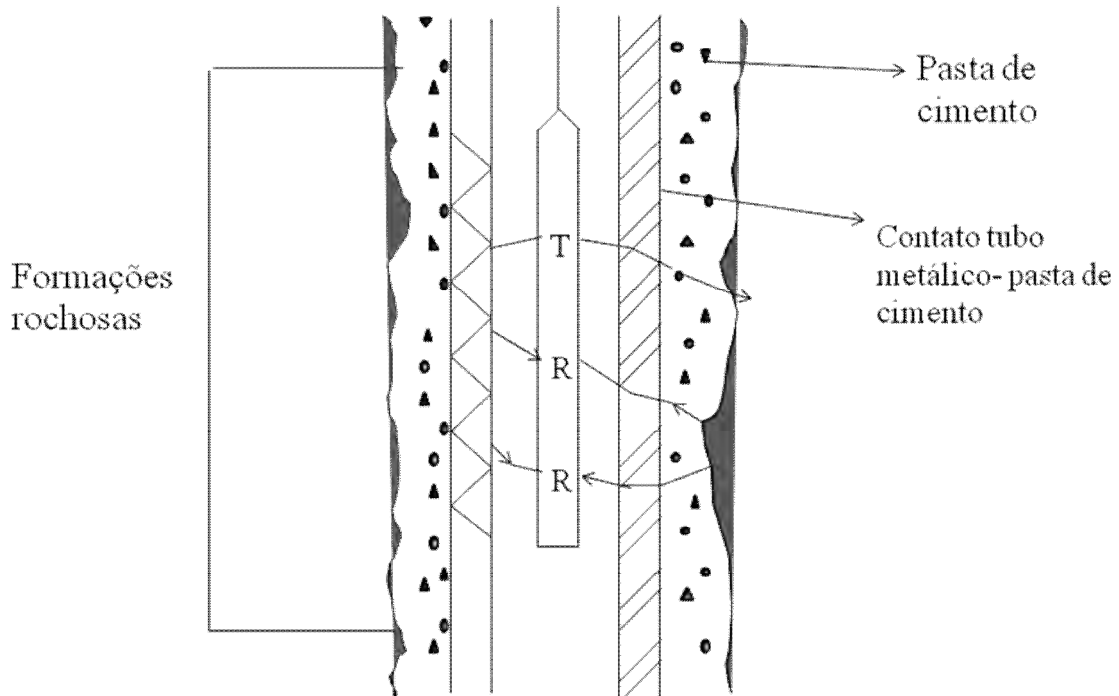


Figura 2.3 Esquema de funcionamento da ferramenta CBL. (adaptada de MINEAR e GOODWIN, 1998).

O CBL é composto de um transmissor (T) e dois receptores (R). O primeiro receptor está a 914 mm do transmissor e o segundo a 1524 mm. A onda emitida pelo transmissor é refletida e refratada seguindo a Lei de Snell. Partindo desse princípio o ângulo de incidência da mesma varia de 0 a 45° e quando outro material é detectado ocorre mudança na direção de propagação (ângulo de refração). Esse ângulo pode ficar entre 0 e 90°. Quando é exatamente 90°, denomina-se ângulo crítico de refração não sendo captado pelos receptores. Para valores próximos a 90° o sinal emitido é captado pelos receptores sendo a partir daí levado à superfície através de cabos, armazenado e processado, sendo observada a atenuação da onda, a amplitude e o tempo de trânsito (MINEAR e GOODWIN, 1998). Com esse processamento têm-se informações do amortecimento e do tempo de trânsito do sinal gerado pelo transmissor (O tempo de trânsito é o tempo gasto na propagação do sinal desde o momento que é emitido pelo transmissor até chegar ao receptor). Esse tempo é influenciado pela posição da ferramenta no momento da medição do sinal, ou seja, excentricidades podem produzir respostas indesejadas.

No que diz respeito ao amortecimento, a partir da variação de amplitude do sinal se tem idéia dele, sendo dado de acordo com a equação (2.1).

$$\alpha = \frac{20}{x_1} \log \frac{A_1}{A_o} \quad \text{(Equação 2.1)}$$

Onde:

α = amortecimento

x_1 = distância de medição do sinal de amplitude

A_1 = amplitude que chega ao receptor

A_o = amplitude do sinal do transmissor

Outro parâmetro importante estudado é o índice de aderência (BI). Este foi sugerido originalmente por Grosmanin et al. (1961) que propôs uma forma de quantificar o quanto do espaço anular está preenchido por pasta de cimento. Ele é dado pela equação (2.2).

$$BI = \frac{(A_{fp} - A)}{(A_{fp} - A_{100})} \quad \text{(Equação 2.2)}$$

Onde:

BI = índice de aderência

A_{fp} = amplitude medida no revestimento metálico sem cimentação

A_{100} = amplitude medida no revestimento metálico completamente cimentado

A = amplitude medida em qualquer profundidade.

As ferramentas sônicas se baseiam no princípio de que a onda se propaga ao longo do revestimento, respondendo à impedância acústica do material sólido que se encontra por trás do revestimento. Quanto mais alta a impedância do material aderido ao revestimento maior será a atenuação da onda. Segundo THOMAS (2004) a atenuação produzida pela aderência da pasta de cimento ao revestimento depende da resistência à compressão, do diâmetro e da espessura do revestimento, assim como da percentagem da circunferência cimentada. No entanto, outro parâmetro que pode afetar a atenuação é a distribuição dos líquidos ao redor do revestimento, pois, quando se tem óleo por trás da

pasta cimento, o CBL pode não conseguir captar como um vazamento, e a atenuação da onda pode não significar fuga de fluido. Por isso a interpretação das medidas sônicas em geral é muito difícil.

2.3.3 Substâncias presentes em poços de petróleo no sistema tubo metálico pasta de cimento

Durante o processo de perfuração e lavagem, diversas espécies iônicas podem estar em contato com os elementos da estrutura do poço, principalmente durante a hidratação e também no contato entre tubo e a pasta de cimento. Uma espécie iônica bastante comum é o íon cloreto (Cl^-), oriundo de minerais, tais como a halita (NaCl), constituintes principal da camada salina dos poços do pré-sal. Os carbonatos estão presentes nas águas subterrâneas, oriundas da dissolução de minerais carbonáticos tais quais a calcita (CaCO_3) e a dolomita (Ca, Mg, CO_3).

Cimentos com quantidades significativas de sais, como o cloreto de sódio (NaCl) e cloreto de potássio (KCl), são comumente utilizados na preparação de pastas para cimentação de poços de petróleo. Entretanto, o NaCl é mais utilizado devido a três razões principais: (a) situações em que a quantidade de água doce é insuficiente para o processo de mistura da pasta de cimento, como em cimentação de poços em mar (offshore), onde nesse caso utiliza-se a própria água do mar na mistura das pastas; (b) os sais podem ser usados também como aditivos em preparo de pastas, podendo funcionar como aceleradores e retardadores de pega, dispersantes, dependendo da composição de cada pasta e das condições da rocha a ser cimentada, (c) cimentação em regiões com grande quantidade de camadas de rochas salinas (NELSON, 1990).

Percebe-se, portanto, o uso extensivo do cloreto de sódio no processo de preparo de pastas de cimento como forma de adequação a situações específicas no que diz respeito a características do poço. No entanto, faz-se necessário, estudos mais precisos do comportamento dessa substância na interface tubo-pasta de cimento, visto que grande parte das pesquisas existentes diz respeito ao desempenho da pasta na presença desta substância e poucos estudos se referem à interferência do cloreto de sódio na interface.

O cloreto de sódio pode interferir de forma positiva na interface tubo-pasta de cimento, aumentando a resistência da pasta de cimento em contato com o revestimento metálico e conseqüentemente aumentando a aderência nessa região. Esse fato ocorre

porque essa substância tem a propriedade de aumentar as reações de hidratação do cimento (TAYLOR, 1990).

O cloreto de sódio pode estar presente também nos fluidos de perfuração. Fluidos de perfuração são fluidos utilizados durante a perfuração de poços de petróleo, que possuem algumas funções básicas: contrabalançar as pressões da formação, carrear os cascalhos até a superfície, resfriar a broca, transmitir força hidráulica até a broca; manter os cascalhos em suspensão quando sem circulação. Os fluidos podem ser a base de água, óleo ou produtos sintéticos.

Estes fluidos são misturas complexas de sólidos, líquidos e sais e têm em sua composição diversas espécies iônicas, incluindo os cloretos e também óleos. São lançados juntamente com os revestimentos metálicos, no processo de perfuração, para fazer a limpeza e regularização das paredes do furo antes de realizada a cimentação.

No entanto, mesmo com todo trabalho criterioso de retirada desses resíduos de fluidos antes de realizado o bombeio da pasta de cimento no espaço anular, pode ocorrer de resíduos contaminarem a pasta com essas substâncias e provocar interferência na aderência da interface tubo-pasta de cimento.

Além de estar presente em alguns tipos de fluidos de perfuração com objetivo de melhorar o desempenho do mesmo na perfuração do poço, os óleos podem surgir também durante o processo de produção onde pode ocorrer vazamento do próprio óleo proveniente das jazidas para a interface tubo-pasta de cimento, reduzindo desta forma a vedação hidráulica nessa região e comprometendo o funcionamento do poço.

A ação de cloretos no aço pode causar corrosão. Segundo (CASCUDO, 1997) corrosão metálica é definida como sendo a transformação de um metal de íon metálico pela sua interação química ou eletroquímica com o meio em que se encontra.

Segundo o mesmo autor a corrosão com relação a forma pode ser classificada em: corrosão generalizada; corrosão por pites e corrosão sob tensão fraturante.

A primeira como a própria denominação salienta, ocorre de uma maneira generalizada em toda a superfície do metal, podendo ser uniforme, com a superfície tendendo a ser lisa e regular, ou não uniforme, apresentando superfície rugosa e irregular. A segunda, também conhecida como por corrosão puntiforme, é um tipo de corrosão localizada, no qual há a formação de pontos de desgastes definidos na superfície metálica, os quais evoluem aprofundando-se, podendo causar a ruptura localizada. A corrosão sob tensão é um outro tipo de corrosão localizada, a qual se dá concomitantemente com a

tensão de tração do aço, podendo dar origem à propagação de fissuras. No entanto, são em ambientes ricos em cloretos e com níveis de tensão muito elevados que sua velocidade de ocorrência é maior e sua incidência passa a ser preocupante (CASCUDO, 1997).

2.4 Adesão tubo-pasta de cimento

Um importante requisito para o bom funcionamento do poço é a eficiência da ligação entre o tubo e pasta de cimento e alguns estudos são feitos com a finalidade de avaliar a adesão do cimento à superfície metálica do tubo.

Os termos adesão e aderência são muitas vezes confundidos e empregados sem respeitar uma definição mais formal que permita distinguir um de outro. A norma ASTM D907, que estabelece a terminologia padrão para adesivos, define adesão como sendo o estado no qual duas superfícies são mantidas unidas. Do ponto de vista da engenharia, a adesão pode ser definida como um fenômeno químico, físico ou físico-químico. A aderência, por sua vez, é entendida como o resultado do fenômeno de adesão. Esse resultado pode ser medido ou quantificado através de ensaios de aderência.

Os fenômenos que envolvem interações entre materiais de natureza cimentícia e o aço estão relacionados com o surgimento do concreto armado, onde o aço fica envolvido por um material cimentício (concreto) e cujo desempenho estrutural tem relação direta com a adesão entre os seus componentes estruturais, ou seja, quanto melhor a adesão, maior a aderência e melhor é o desempenho do concreto armado. No concreto armado pode-se definir adesão como sendo o mecanismo de transferência de tensões que existe na interface entre a barra de aço da armadura e o concreto que a envolve.

A determinação da condição de adesão entre um metal e um material cimentício é bastante complexa e envolve duas componentes principais: uma componente química e uma componente física.

A componente química surge devido às ligações físico-químicas geradas na interface durante as reações de hidratação do cimento. Essa parcela é caracterizada por uma aderência que pode ser medida, por exemplo, através da separação de um bloco concretado aderido a chapa metálica de superfície lisa. Neste caso, verifica-se a predominância da componente química da adesão.

A contribuição da componente física da adesão está relacionada com a natureza da superfície que está sendo aderida. Dessa forma, a aderência medida através de um ensaio de arrancamento de uma barra nervurada aderida ao concreto tende a ser maior do que aquela obtida no mesmo ensaio feito com uma barra lisa.

Na literatura podem ser encontrados alguns trabalhos que se dedicaram a avaliar a aderência tubo-pasta de cimento no caso específico do problema dos poços de petróleo.

2.4.1 Estudos realizados para detecção de aderência em poços de petróleo

CARTER e EVANS (1964), usando cimento classe A e temperatura de cura de 26,7 °C, com tempo de ensaio de um dia; submeteu tubos a quatro condições de contatos e observou que para tubos tratados com areia a tensão de cisalhamento encontrada foi de 16536 kPa, para tubos enferrujados a tensão de cisalhamento foi de 971,49 kPa; tubos tratados com hidrojateamento de areia a tensão de cisalhamento reduziu para 847,47 kPa e para verniz moído a tensão foi de 544,31 kPa.

Em estudo feito por MUSAED (1996), observando os fatores que afetam a primeira cimentação, verificou que a excentricidade do tubo em relação a pasta de cimento é um dos fatores que afetam a tensão de aderência. Quando o tubo está centrado em relação a pasta, ou seja sem excentricidade, a tensão de aderência chega à 2 MPa, para idade de sete dias. À medida que se desloca o tubo em relação a pasta de cimento há uma diminuição na tensão de aderência. Isso demonstra que a excentricidade é um fator que nela interfere

Em um trabalho apresentado por PEREIRA (2005), utilizando cimento especial classe G, submeteram-se tubos a condição de contato com petróleo bruto, observando uma perda de aderência em torno de 90%, quando comparados a tubos submetidos à lixamento longitudinal; lixamento transversal e tubos hidrojateados com areia.

FREITAS (2007) realizou um trabalho para verificação da tensão de cisalhamento, utilizando cimento especial classe G; e percebeu que tubos normais (condição de contato limpa e seca) apresentaram tensão de $77,4 \pm 0,76$ kPa, enquanto tubos tratados (hidrojateados) apresentaram tensão de cisalhamento de $1428 \pm 0,89$ kPa.

FREITAS (2007) também estudou condições de aquecimento do sistema tubo pasta, usando cimento especial classe G, avaliou três temperaturas 100 °C, 150 °C e 200 °C. Ele observou um aumento na tensão de aderência com o aumento da temperatura. Para

temperatura ambiente a média da tensão encontrada foi de $79,90 \pm 0,66$ kPa, enquanto a temperatura 100 °C, foi de $122 \pm 0,81$ kPa; a temperatura de 150 °C a tensão passou a $134,80 \pm 0,88$ kPa e para 200 °C a tensão de aderência aumentou para $191,75 \pm 0,96$ kPa.

Do exposto, pode-se notar a grande variação nos valores numéricos das tensões de aderência obtidas na literatura: de 0,08 MPa até 16,5 MPa.

Em resumo, além das condições das superfícies de contato, os fatores que aparentam influenciar a aderência sob ações estáticas são:

- Tipo, velocidade e duração do carregamento;
- Temperatura;
- Idade da pasta
- Relação (a/c) da pasta.

Apesar da velocidade de carregamento ser um fator que influencia a aderência, até o presente momento não encontrou-se nenhum documento científico que comprove a significância deste fator.

2.5 Ações cíclicas para análise de adesão

Dentre os vários tipos de ações dinâmicas existentes em uma estrutura, estão presentes as ações cíclicas, as quais são caracterizadas por uma variação de seu valor.

O carregamento cíclico pode ser classificado de acordo com o número de ciclos e com o tipo de tensão aplicada. De acordo com o tipo de tensão aplicada, o carregamento pode ser repetido ou unidirecional (caso típico de carregamento de fadiga), ou alternado (característica de sismos)

A fadiga é um fenômeno associado às ações dinâmicas repetidas e pode ser definida como o processo de modificações progressivas e permanentes da estrutura de um material submetido a tensões repetidas (AGUIAR, 2006). Estas alterações podem ser danosas, resultando em aumento progressivo de fissuras internas, podendo evoluir a eventuais fraturas do material, caso a repetição seja suficientemente grande.

Nas ações de serviço das estruturas, os efeitos desfavoráveis das ações repetidas são observados através da formação prematura de fissuras, aumentando a fissuração e as deformações.

A falha por fadiga é resultante da aplicação e da remoção contínua de um carregamento e pode ocorrer sob elevado ou reduzido número de ciclos. Quando o número de ciclos é inferior a 10^4 ciclos para causar dano, a fadiga é denominada de baixo ciclo. Quando o número de ciclos supera esta faixa, a fadiga é denominada de alto ciclo.

Segundo MORGADO, BRANCO e INFANTE (2007) o dano por fadiga é a deteriorização das propriedades de um material por efeito da aplicação cíclica de uma carga, este ocorrendo em cargas de amplitudes constantes e também em amplitudes variáveis.

Existem deferentes estágios de dano por fadiga em componentes onde defeitos podem ser desencadeados em uma seção inicial de uma maneira estável até resultar em fraturas irreversíveis (AGUIAR, 2006). Ou seja, o crescimento de defeitos microscópicos, formando fissuras dominantes, podem eventualmente levar a falhas irreversíveis.

As condições para o crescimento de defeitos microscópicos e a proporção (velocidade) de avanço da fissura para fadigas irreversíveis são influenciadas por uma grande variedade de fatores mecânicos, micro estruturais e ambientais (DRIMIER, 1995). Alguns dos parâmetros que têm sido usados são o crescimento de fenda, diminuição do limite de fadiga e crescimento da deformação plástica (MORGADO, BRANCO e INFANTE (2007)), sendo a intensidade da fadiga relacionada às propriedades dos seus materiais componentes (FERNANDES, 2000).

O número de ciclos que define a vida total de uma estrutura submetida às cargas cíclicas é a combinação entre o número de ciclos necessária à iniciação da fissura e o que corresponde a sua propagação até a falha final. Em alguns casos onde há concentrações de tensão ou defeitos de superfície, o tempo de iniciação é muito curto e a trinca é formada logo no começo da vida total, enquanto que em materiais cuidadosamente acabados e livres de defeitos, o tempo de iniciação pode chegar a 80% da vida útil (SURESH, 1998).

2.5.1 Dano cumulativo

Na maioria das vezes uma estrutura sofre cargas variáveis, de amplitude não necessariamente constante, ao longo da vida de fadiga, dificultando a análise de fadiga do próprio componente. Em muitos casos a sequência com que a magnitude da carga varia é aleatória.

Um processo simples foi proposto por Palmgren e representado por Miner, ficando conhecido como regra de Palmgren-Miner ou regra linear de acúmulo de dano. De acordo com essa regra o dano que a peça sofreu sob ação de uma dada amplitude de tensão cíclica é diretamente proporcional ao número de ciclos atuantes em que atuou a amplitude de tensão, ou seja o dano é definido como proporcional à relação de ciclos n_i/N_i , onde n_i é o número de ciclos de carregamento realizados durante um certo período de análise, e N_i é o número de ciclos correspondente à ruptura para um mesmo nível de carregamento. Esta relação é também chamada de vida relativa a fadiga.

Apesar da regra de Palmgren- Miner não considerar a influência da sequência do carregamento, da não linearidade do acúmulo do dano e das tensões residuais, esse modelo, para questões práticas, ainda constitui a melhor forma de previsão de ruptura para ações cíclicas, tanto em metais como em concretos. (DRIMIER, 1995, FERNANDES, 2000).

Em pesquisas realizadas por BALÁZS (1991) teve-se resultados experimentais de ensaios de arrancamento devido a ações repetidas e cíclicas alternadas. As principais variáveis analisadas foram: diâmetro da barra (diferentes áreas relativas das nervuras), comprimento de aderência e história do carregamento. Balázs concluiu que para carregamento repetido a regra de Palmgren-Miner se mostrou inadequada para prever o acúmulo do dano da aderência por duas razões:

- (a) a regra de Miner não leva em conta a sequência de aplicações de carga ou tensões, ou seja, a regra diz que o dano é o mesmo, para sequências de altas para baixas tensões e de baixas para altas tensões. Para Balázs o carregamento produz diferentes danos.
- (b) a taxa de dano acumulado é independente do nível de tensão. Para Balázs em altas amplitudes as trincas se iniciam em poucos ciclos e em baixas amplitudes de deformações, quase toda a vida é gasta para fissuração.

KOCH e BALÁZS (1998) analisaram espécimes sob ação repetida, e concluíram, que quanto maior o nível de carregamento, menor a vida à fadiga ou número de ciclos necessários para produzir um certo deslizamento.

A grande maioria das estruturas de engenharia está sujeita a cargas que são de um modo geral variáveis no tempo, embora muitas vezes o carregamento seja estático, em uma primeira observação. Uma falha por fadiga ocorre dentro de uma gama bastante ampla de ciclos de carga desde de valores da ordem de 10 ciclos até mais de 10^8 ciclos (Aguiar,2006). É evidente que o número de ciclos que a estrutura resiste depende do nível da solicitação, pois com uma carga dinâmica maior tem-se uma vida útil reduzida, quando comparada com uma situação onde a solicitação cíclica é menor, o qual levaria a uma maior vida.

A possibilidade de uma falha por fadiga ocorre nas mais diferentes situações, com o número de ciclos que a estrutura deve resistir variando em uma ampla faixa. Esta vida deve assegurar uma operação segura sem falhas.

Uma fissura em escala microscópica levada a uma propagação de trinca macroscópica, tem uma velocidade de propagação constante, comprometendo assim uma estrutura, muitas vezes de forma irreversível, levando dentro de um pequeno espaço de tempo a uma ruptura final (FERNANDES 2000, AGUIAR, 2006).

RIBEIRO, ABÍLIO e FERNANDES (2007) relaciona a vida total à afadiga de um componente estrutural através da soma de ciclos. N_t , onde N_i é a soma do número de ciclos passados na fase de iniciação de uma fenda, e N_p é o número de ciclos decorrentes da fase de propagação.

$$N_t = N_i + N_p \quad \text{(Equação 2.1)}$$

2.6 Comportamento tensão-deformação

Segundo METHA e MONTEIRO (2008), observando as curvas típicas tensão-deformação ($\sigma - \epsilon$) para agregado, a pasta endurecida e o concreto sob compressão uniaxial na Figura 5.1(a), o concreto apresenta um comportamento não elástico compreendido entre o diagrama do agregado e o da pasta de cimento. Nem a deformação sob carregamento instantâneo de um corpo de prova de concreto é diretamente proporcional à tensão aplicada, nem está totalmente recuperado após o descarregamento.

A curva tensão deformação do concreto na Figura 2.4 (b) apresenta um trecho linear estático até aproximadamente 30% da resistência final (f_c) porque sobre

carregamento rápido as micro fissuras na zona de transição permanecem estáveis. Para tensões acima deste ponto, até cerca de 50 % de $f_c^{\bar{\sigma}}$, na medida em que a tensão aumenta, as micro fissuras da zona de transição começam a aumentar em comprimento, largura e número. Entretanto, pode-se admitir que exista um sistema estável de micro fissuras na zona de transição, devido a fissuração na matriz ser considerada ainda desprezível. A partir de 50 a 60% de $f_c^{\bar{\sigma}}$, começam a formar-se fissuras na matriz. Com o aumento adicional até cerca de 75 % de $f_c^{\bar{\sigma}}$, não só o sistema de fissuras na zona de transição torna-se instável, mas também a proliferação e propagação de fissuras na matriz aumenta, fazendo com que a curva tensão deformação incline-se consideravelmente em direção à horizontal. Acima de 75 a 80 % de $f_c^{\bar{\sigma}}$, a taxa de liberação de energia de deformação parece atingir o nível crítico necessário para o crescimento espontâneo das fissuras sob tensão constante e o material se deforma até o colapso. Em resumo, acima de 75 % de $f_c^{\bar{\sigma}}$, com o aumento da tensão, desenvolvem-se deformações muito grandes, indicando que o sistema de fissuras depois muda bruscamente de declividade (torna-se quase horizontal no topo) e finalmente desce, até o corpo de prova sofrer ruptura.

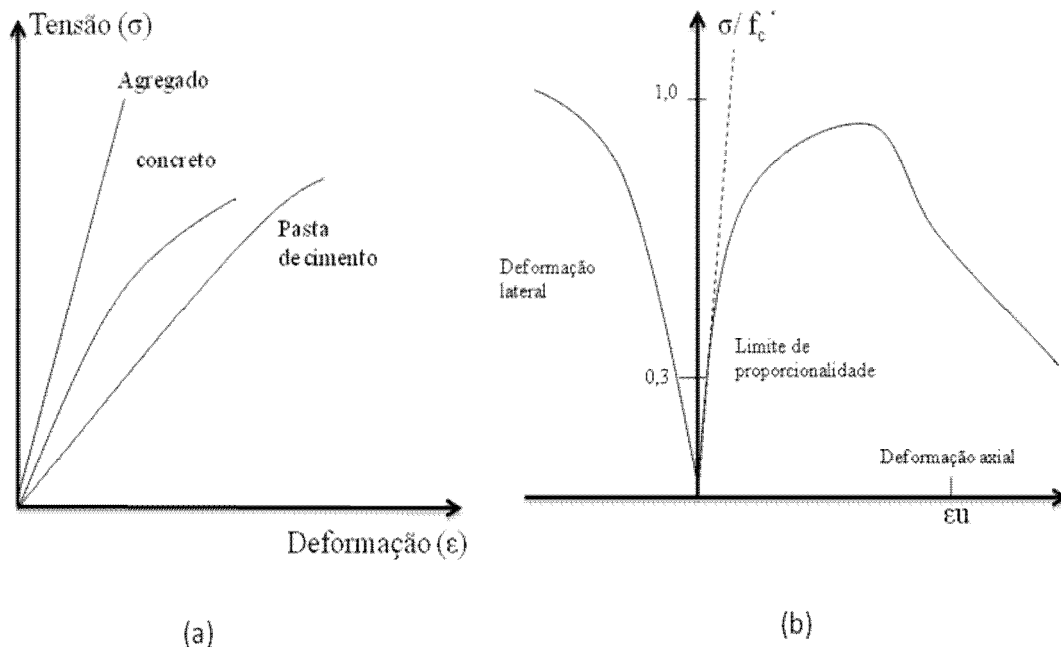


Figura 2.4 Comportamento típicos tensão-deformação de pasta de cimento, agregado e concreto(a); Curva tensão-deformação do concreto (b).

Na superfície de contato tubo metálico- pasta de cimento, a transferência de energia tem que se manter no regime elástico, ou seja, bastante inferior a 30% da carga de ruptura, para garantir que haja distribuição uniforme das deformações bem como não haja deformação permanente que induza ao dano. Desta maneira, a Figura 2.5 tipifica um contato de um material elástico com ancoragem na rugosidade das paredes externas do tubo. Desta forma, a reologia e propriedades mecânicas do material de revestimento bem como das alterações no contato que afetem suas propriedades do material elástico engastado também terão efeito na adesão. Estas necessitam de investigações sistemáticas de forma a representar o comportamento e a integridade estrutural de poços, onde há uma variedade de situações que atuam em ambas as fases do poço, o tubo, a interface e o material cimentício de revestimento.

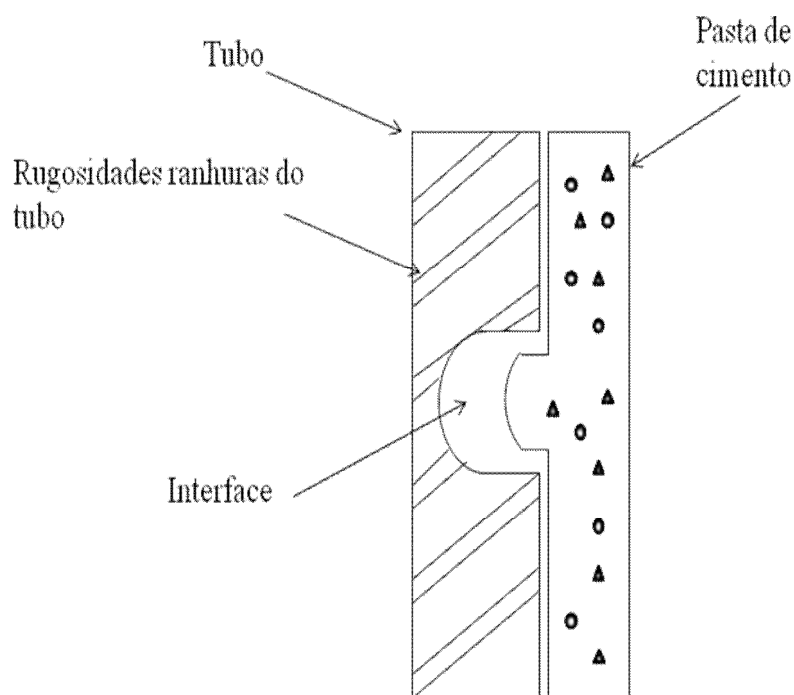


Figura 2.5 Esquema para interface.

2.7 Natureza dos esforços dinâmicos atuantes no contato tubo metálico-pasta de cimento

A - Bombeamento

Na coluna de produção, pode haver efeitos de vibrações, causada pela movimentação oriunda do processo de bombeio mecânico. Por exemplo, a haste de bombeio de um sistema de bomba de superfície pode chegar a uma frequência de 20 cm/min nas hastes (THOMAS, 2004). Outros esforços dinâmicos no sistema haste/coluna de produção associado ao processo de bombeio impões pressões cíclicas nas condições radiais e longitudinais do tubo, e consequentemente no contato tubo-pasta de cimento de produção; tornando-se assim um dos pontos mais críticos da operação do poço.

O ciclo de bombeio é composto de movimentos ascendentes e descendentes. Durante o movimento ascendente o peso do fluido que está acima do pistão, comprime o tubo metálico em todas as direções, mantendo a válvula de passeio fechada, a baixa pressão criada na camisa da bomba, faz com que esta se abra, havendo assim a passagem do fluido que esta no anular para o interior da bomba.

No movimento descendente o fluxo que está na camisa da bomba é comprimido e com isto há o fechamento da válvula de pé, como o pistão continua descendo a pressão acima e abaixo da válvula de passeio se equilibram e esta se abre, permitindo a passagem do fluido para cima do pistão. Ao atingir o final do curso descendente e iniciar o curso ascendente, a válvula de passeio fecha e a de pé se abre, iniciando um novo ciclo. Conforme Figura 2.6.

Com o movimento ascendente e descendente da haste, há formação de força de fricção devido a o contato do fluido com a coluna de produção, além das forças radiais e longitudinais.

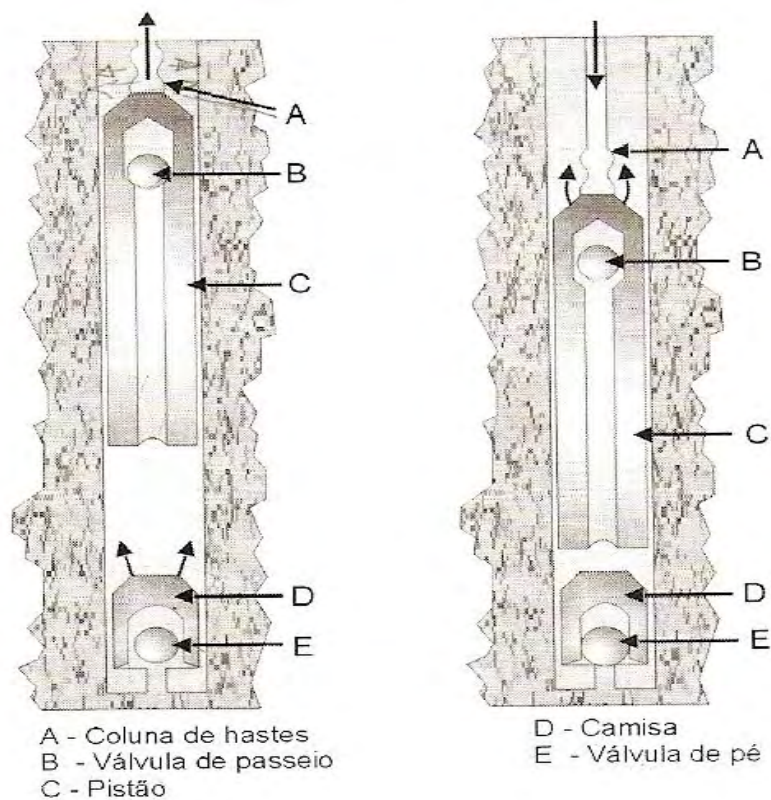


Figura 2.6 Partes da bomba e ciclo de bombeio (THOMAS, 2004).

B ã Canhoneio

São cargas explosivas que tem a finalidade de comunicar o interior do poço com a formação produtora. Essa explosão gera ondas que se propagam em todas as direções do poço, atravessando o revestimento, o cimento e penetrando na formação rochosa. A velocidade de reação ou detonação varia de 500 m/s a 9000 m/s.

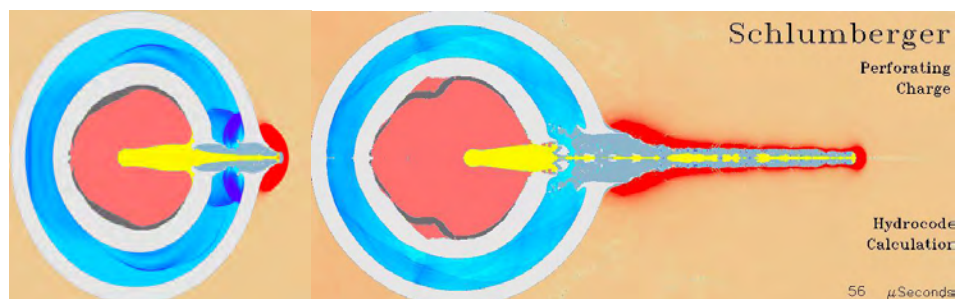


Figura 2.7 Vista superior de uma explosão por canhoneio.

C ã Injeção de vapor

A injeção de vapor é um método de recuperação utilizado quando há declínio de produção. O papel do fluido injetado é de fazer com que haja deslocamento do óleo, quando este é muito viscoso.

A injeção de vapor produz um aumento da temperatura da região produtora. A injeção pode ser feita através de um fluido aquecido ou pela combustão *in situ* do gás natural. Este tipo de recuperação são os mais empregados na região de Mossoró. (PINTO 2007).

A estimulação cíclica através de vapor em poços de petróleo, tem sido extremamente empregada em poços que possuem petróleo com altas viscosidades. Os ciclos de injeção de vapor são caracterizados, em linhas gerais pelos seguintes estágios:

- a) Injeção de vapor durante alguns dias, podendo chegar até um mês, em quantidades que variam de centenas a milhares de toneladas de m^3 de fluido em uma bateria de poços previamente definida;
- b) Interrupção da injeção seguida de uma espera de alguns dias, podendo chegar a duas semanas para que as pressões no reservatório se estabilizem. Esta espera é conhecida como impregnação e
- c) Recuperação do petróleo por meio mecânico e monitoramento da taxa de recuperação. Quando o poço, ou conjunto de poços, apresentam taxas de recuperação insatisfatórias, a região receberá nova ciclagem de injeção de vapor e os estágios se repetirão.

Quando o calor é inicialmente injetado, o aumento da temperatura pode provocar níveis de tensões superiores a que o poço pode suportar, prejudicando a bainha de cimento.

Devido aos fatores dinâmicos apresentados percebeu-se que o ensaio estático comumente utilizado pelas empresas responsáveis pela cimentação de poços de petróleo, não contemplam tais fatores; uma vez que pode haver danificação do poço com uma tensão menor que a prevista durante o ensaio estático.

2.8 Mecanismos de dissipação de energia

O amortecimento é um parâmetro indicativo da análise da qualidade do contato entre o cimento e o tubo metálico em poços de petróleo, uma vez que esse contato com o cimento dissipa a energia da onda incidente. Isto porque esta grandeza refere-se a capacidade do contato em transferir energia para a camada de cimento, reduzindo a energia da onda que se propaga no tubo, conforme esquema da Fig. (2.3). Amortecimento é o processo pelo qual, durante uma vibração a energia é dissipada. Esta dissipação ocorre por meio da resistência ao movimento das partículas, da movimentação de abertura e fechamento de trincas e poros, como também da movimentação de fluidos no interior da porosidade durante a propagação da onda. Sendo assim classificado como de origem estrutural, viscoso e friccional, todos presentes no processo de dissipação e afetados pela frequência e nível de tensão as quais a estrutura esteja submetida. Em baixas frequências, o mecanismo predominante é o estrutural enquanto que o viscoso e friccional adquirem grande importância em altas frequências (JORDAN, 1980).

O amortecimento de estruturas de concreto armado é um parâmetro, cuja determinação é bastante complexa. Segundo CLOUGH (1986) o amortecimento de elementos de concreto armado está compreendido numa faixa quase elástica e depende bastante do estado de tensão ao qual está submetido o elemento. Embora os poços de petróleo sejam constituídos de pasta cimento, a interação entre a pasta e o material metálico pode ser comparada com o que acontece em estruturas de concreto armado, preservando-se o fato de que as armaduras são bem mais rugosas no último caso. Para níveis baixos de tensão, que corresponde ao estado não fissurado, o fator de amortecimento é baixo ($< 1\%$), função da microestrutura, do sistema poroso e de sua saturação. Com a formação de fissuras o fator de amortecimento aumenta. Alguns pesquisadores indicam que certas propriedades do concreto podem estar relacionadas com sua capacidade de dissipar energia (SPOONER, e DOUGILL (1976), SWAMY e RIGBY (1971) e JORDAN (1980)).

Neste sentido, os testes feitos através de carregamento cíclico, além da aderência, são capazes de avaliar o papel do contato no amortecimento da onda propagada na tubulação do poço de forma inovadora. No presente trabalho, a dissipação que ocorre durante a propagação das tensões oriundas das oscilações cíclicas inferidas ao tubo é avaliada através do nível de deformação sofrido na pasta de cimento que contem a

tubulação em um regime elástico. Também, a capacidade de se manter tal nível de transferência de energia que gera deformação na camada externa do cimento ao longo do tempo é uma abordagem inédita que permite fornecer informações acerca do ciclo de vida da estrutura ao longo do tempo bem como o papel de diversas condições de contato na integridade das estruturas de poços de petróleo.

CAPÍTULO III

3.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Introdução

Em virtude do percebido no estado da arte, resolveu-se no planejamento dividir o procedimento experimental em duas partes: parte (1) estática (ensaio de arrancamento) e parte (2) dinâmica (ensaio cíclico)

Para se obter um planejamento experimental completo, os ensaios foram realizados, com todas as possíveis combinações dos níveis e dos fatores, para cada parte. A ordem dos ensaios foi feita de forma aleatória, ou seja, sorteou-se a sequência dos testes, com a finalidade de minimizar a propagação de erros. Todos os ensaios foram feitos em triplicatas.

3.2 Ensaio estático

A parte (1), estática, foi subdividida em duas etapas:

Na primeira etapa, observaram-se os fatores velocidade, relação (água/cimento), temperatura, e condição de contato. A velocidade foi estudada em três níveis; a relação (a/c), a temperatura e a condição de contato em dois níveis.

Na segunda etapa os parâmetros estudados foram: condição de contato, idade, relação (a/c) e temperatura. A condição de contato e a idade foram estudadas em três níveis e a relação (a/c) e temperatura em dois níveis.

Uma visão esquemática do procedimento experimental para parte (1) é vista na Figura 3.1.

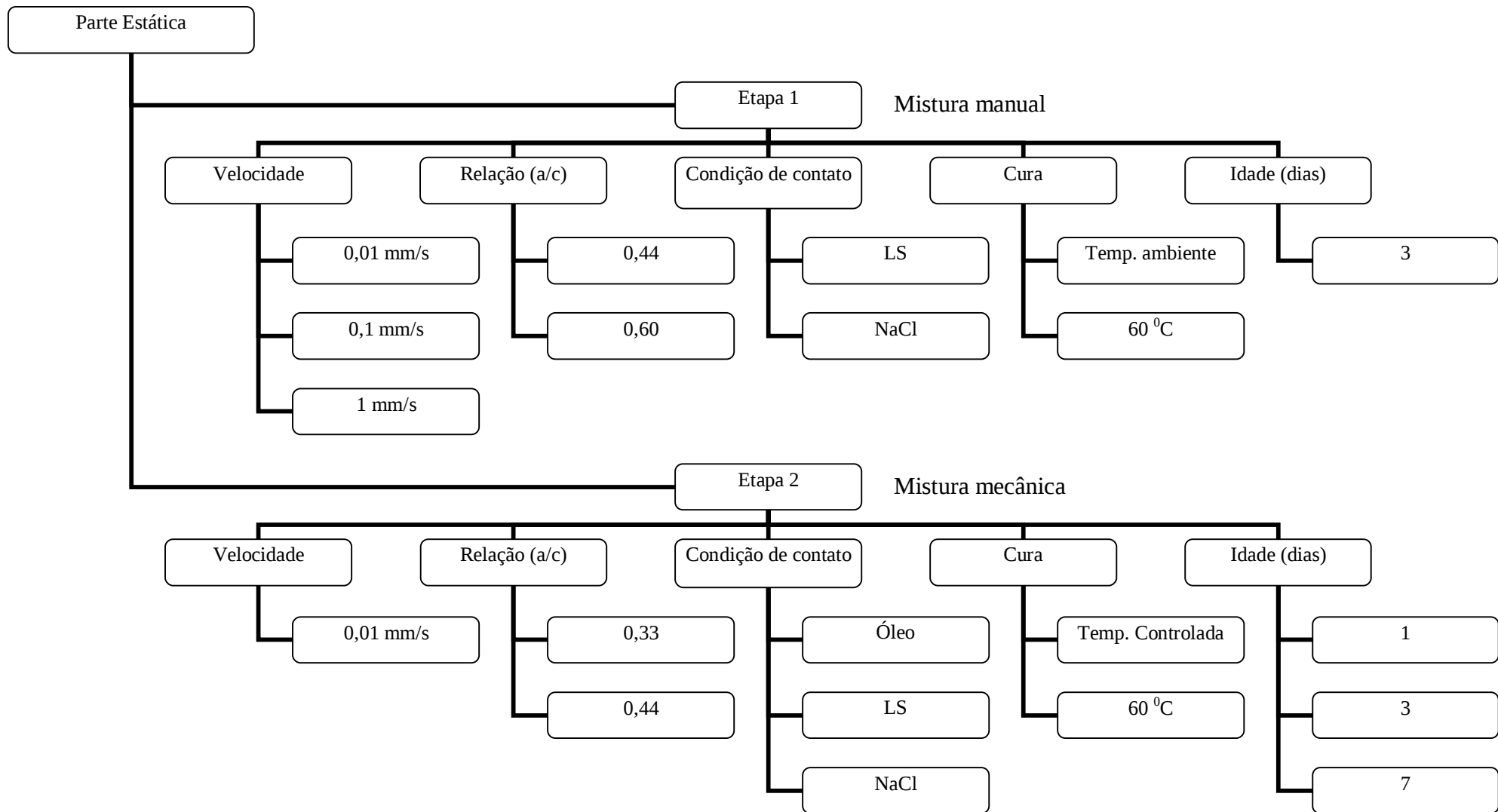


Figura 3.1 Planejamento experimental parte estática.

Em virtude do fato de a idade (I), a relação água/cimento (a/c) e a temperatura (T) afetarem as propriedades mecânicas do cimento Portland, variaram-se esses parâmetros, conforme consta na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 Parâmetros avaliados na pesquisa.

Fatores	Etapa I	Etapa II
(a/c)	0,44	0,33
	0,60	0,44
T	Temperatura ambiente não controlada Temperatura a 60 °C	Temperatura ambiente controlada Temperatura a 60 °C
I	3 dias	1 dia
		3 dias
		7 dias

A escolha da relação (a/c) 0,44 se deve ao fato, de este ser o mais utilizado para cimentação de poços de petróleo. As relações 0,60 e 0,33 foram também adotadas para se avaliar como se comportaria a condição de contato tubo-pasta de cimento, para uma pasta mais e menos fluida que a utilizada comumente na cimentação de poços de petróleo.

A escolha da temperatura 60 °C foi devido ao fato de ser aproximadamente a temperatura dos poços nordestinos.

A escolha da idade de um dia se deve ao fato de que se coloca o poço em produção até oito horas após sua cimentação. A idade de três dias foi para avaliar o que ocorre com a pasta já mais hidratada. Finalmente a idade de sete dias foi utilizada porque o cimento CPV-ARI nessa idade já apresenta resistência próxima à máxima.

Quanto à velocidade de aplicação de carga, apesar de ela influenciar na tensão de aderência máxima, até o momento não foi identificada a magnitude dessa variável. Resolveu-se então, trabalhar com três velocidades: 0,01 mm/s, 0,1 mm/s e 1 mm/s, ou seja, uma velocidade lenta, uma moderada e uma velocidade alta. Note-se que o equipamento

tem controle de deslocamento, daí a velocidade de aplicação de carga estar expressa em mm/s.

Uma vez que durante a perfuração de poços o tubo metálico pode entrar em contato com água salgada e com óleo, estes podem afetar o contato tubo-pasta de cimento. Optou-se em variar as condições superficiais do tubo, fazendo-a entrar em contato com NaCl e óleo, comparando-se os resultados com o tubo na condição de contato limpa e seca (LS).

Para testar condições de mistura diferentes resolveu-se, na primeira etapa, utilizar mistura manual, enquanto que na segunda etapa e para parte 2, a mistura foi mecânica

3.2.2 Materiais

3.2.1.1 Cimento

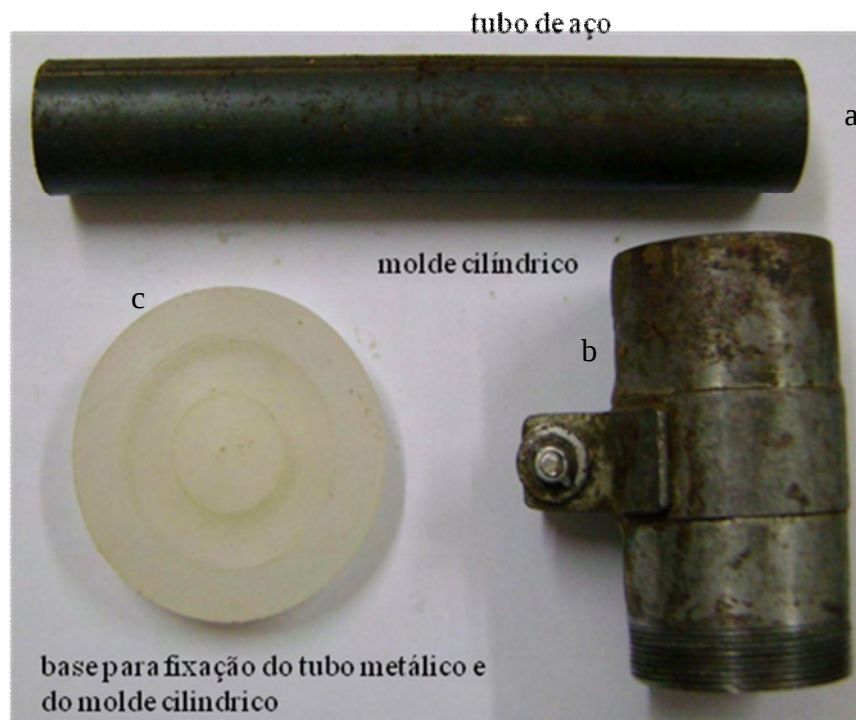
O cimento utilizado foi o CP V- ARI, que pode ser usado em alguns casos de cimentação de poço.

3.3 Metodologia

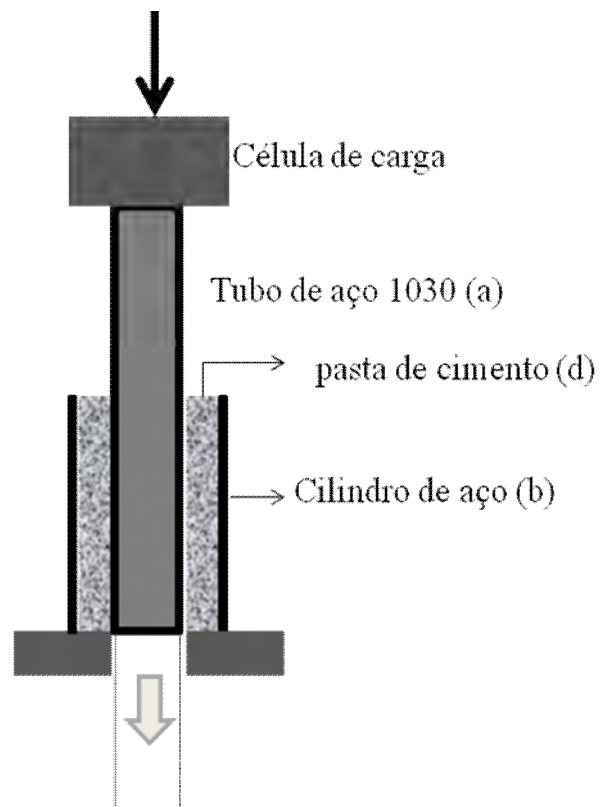
3.3.1 Ensaio Estático

3.3.1.1 Preparação dos corpos de prova

Na Figura 3.2 tem-se os materiais utilizados na confecção dos moldes e o desenho do corpo-de-prova empregado nos ensaios estáticos. Esses materiais foram os mesmos para primeira e segunda etapa.



(a)



(b)

Figura 3.2 (a) materiais usados nos moldes (b) representação do ensaio estático.

Nos moldes dos corpos-de-prova foram utilizados:

- a) Tubo de aço 1030 com diâmetro externo de 33,20 mm; diâmetro interno de 32,00 mm e comprimento de 200 mm, com função de simular o revestimento metálico do poço de petróleo;
- b) Moldes de corpos de prova cilíndricos em aço com diâmetro externo de 55,0 mm; diâmetro interno 50,0 mm e comprimento de 100 mm, com função de simular a formação rochosa;
- c) Nylon para base de fixação, uma vez que este material é impermeável e suporta temperaturas até 100 °C;
- d) Pasta de cimento Portland.

A máquina de ensaios universal Shimadzu Servopulser, usada nos ensaios, limitava o comprimento dos tubos à 200 mm. A altura da pasta de cimento em contato com o tubo foi de 100 mm.

Usualmente, o diâmetro do tubo de produção do poço é entre 40 a 110 e a espessura da bainha da pasta é aproximadamente 25 mm. A fim de preservar a proporção fez-se uma redução de escala e adotou-se um diâmetro externo 33,2 mm e espessura da bainha de 6,4 mm.

3.3.1.2 Condição de contato dos tubos

Na primeira etapa os tubos passaram por duas condições de contatos: o primeiro consistiu na lavagem dos mesmos com água e sabão, sendo enxutos com um pano. Chamou-se de LS (condição de contato limpa e seca). A segunda condição de contato consistiu em dissolver 3% de NaCl (cloreto de sódio) em 1 litro de água (correspondendo a aproximadamente ao teor de sal na água do mar e utilizada nos fluidos de perfuração), sendo aplicada na superfície externa do tubo com o auxílio de um borrifador, chamado-se esta condição de contato NaCl.

Após serem limpos com água e sabão, tratados (pintados) com óleo, foram reutilizados.

Na segunda etapa, além da condição de contato LS (limpo e seco) e do NaCl (cloreto de sódio), adicionou-se uma nova condição de contato à base de óleo, que consistiu em aplicar no tubo, com pincel óleo MG 1 ñ SAE 40.

Para a primeira e segunda etapas com a condição de contato a base de NaCl e para o procedimento à base de óleo, referente a segunda etapa, a pasta foi colocada imediatamente após o tubo ter sido tratado. Na condição de contato NaCl os tubos foram reaproveitados até três vezes; após esse número de repetições ele perde a camada protetora de óxido, ficando com aspecto brilhante. Para a condição de contato óleo, os tubos foram reutilizados até cinco vezes. Essa quantidade de repetições de uso deveu-se ao fato, de se ter percebido uma diminuição na tensão de aderência, quando se ultrapassava as repetições citadas.

3.3.1.3 Preparação das pastas

Na primeira etapa, utilizaram-se duas relações (a/c) 0,44 e 0,60. A quantidade de cimento usada em cada moldagem foi 300g de cimento. A mistura foi feita manualmente durante seis minutos. A pasta foi então colocada nos moldes com auxílio de um bico pontiagudo, conforme Figura 3.3.



Figura 3.3. Colocação da pasta nos corpos de prova.

Na segunda etapa, usou-se o misturador 713 D da marca Firstom,, com rotação de 2600 rpm, sendo a pasta misturada por 4 minutos. No entanto, após a colocação da pasta, os corpos de provas foram vibrados, por um período de 2 minutos, com a finalidade de eliminar bolhas de ar presentes na pasta. Nesta etapa adotaram-se as relações (a/c): 0,33 e 0,44.

Para a relação (a/c) 0,33 a pasta foi colocada nos moldes já com este vibrando; pois, neste caso, a fluidez da pasta é pequena

3.3.1.4 Cura

A cura dos corpos-de-prova na primeira etapa em que não houve controle de temperatura foi feita através do envolvimento deles com filme plástico.

Os corpos-de-prova mantidos a 60 °C permaneceram em estufa sem nenhum procedimento de cura, tão logo foram moldados até a hora do ensaio. Eles foram transportados em caixas de poliestireno expandido até o forno da máquina de testes, que se encontrava previamente aquecido naquela temperatura.

Na segunda etapa, após a moldagem, os corpos-de-prova foram imediatamente colocados em caixas de poliestireno expandido, envoltos com filme plástico, os quais foram deixadas pelos períodos de 1, 3 e 7 dias com temperatura constante de 30°C. Para aferir a temperatura utilizou-se um termômetro, através de três leituras diárias.

Apresenta-se na Figura 3.4 o sistema de acondicionamento dos corpos-de-prova antes do ensaio. É importante salientar que a temperatura de 30 °C é constante para até 6 (seis) corpos de prova dentro da caixa de poliestireno expandido. Ou seja, existe uma variação de temperatura de acordo com o número de corpos-de-prova que são acondicionados.

Na segunda etapa quando se usou a temperatura de 60 °C, no processo de cura consistiu em envolver os corpos-de-prova com filme plástico.



Figura 3.4 Acondicionamento em caixa de poliestireno expandido.

3.3.1.5 Ensaio de aderência

Os ensaios foram feitos em máquina universal Shimadzu Servopulser com célula de carga de 50 kN.

Na hora do ensaio os corpos-de-prova foram colocados em uma base de metal, que permitiu a passagem apenas do tubo (Figura 3.5). A carga foi aplicada na extremidade superior do tubo.



Figura 3.5 Representação do ensaio estático de aderência.

Tensão de aderência máxima

A casca formada pela pasta de cimento, por se achar confinada lateralmente, pode ser retirada após o ensaio. O deslizamento do tubo após o ensaio não chega a quebrá-la. Este procedimento foi feito em outro equipamento (Figura 3.6). Pôde-se medir os diâmetros e o comprimentos reais.



Figura 3.6 Esquema para retirar a casca de cimento.

A tensão de aderência aqui considerada corresponde à força máxima lida no equipamento, dividida pela área do contato, conforme a equação 3.1:

$$\tau = \frac{F}{\pi.D.C} \quad \text{(Equação 3.1)}$$

Onde:

τ : Tensão de aderência (kPa);

F : Força máxima lida na máquina de ensaios (kN);

D : Diâmetro do tubo de aço (m);

C : Comprimento da casca de cimento em contato com o tubo de aço (m).

O diâmetro do tubo de aço e o comprimento da casca da pasta de cimento foi obtido através da média de três medidas.

3.3.2 Ensaio dinâmico

Os parâmetros utilizados para avaliação do regime dinâmico quase estático do sistema tubo-pasta de cimento foram: idade (I) variando em 1, 3 e 7 dias, condição de contato LS e NaCl em massa, temperatura de cura a 30 °C e relação (a/c) 0,44. O fluxograma correspondente acha-se na Figura (3.7).

.

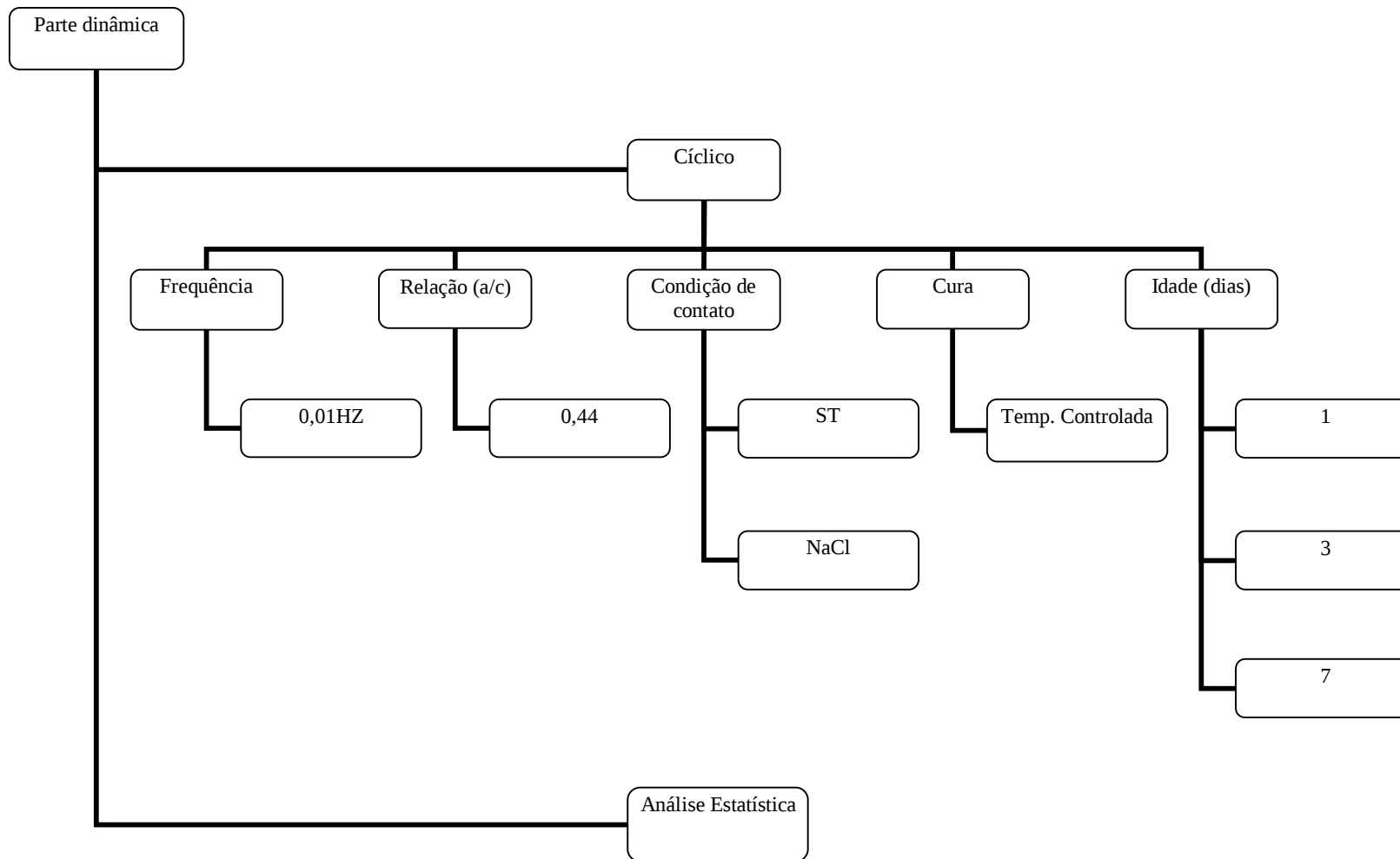


Figura 3.7 Planejamento experimental parte dinâmica.

3.3.2.1 Preparação dos corpos de prova

As bases em nylon foram confeccionadas de modo a serem vazadas no centro com o diâmetro externo igual ao do tubo de aço. Em uma face fez-se uma reentrância, para encaixe do molde cilíndrico e na outra face fez-se outra reentrância onde foi possível encaixar outra base de tubo de aço, com diâmetro superior, para que o corpo de prova permanecesse em pé, conforme Figura 3.8.

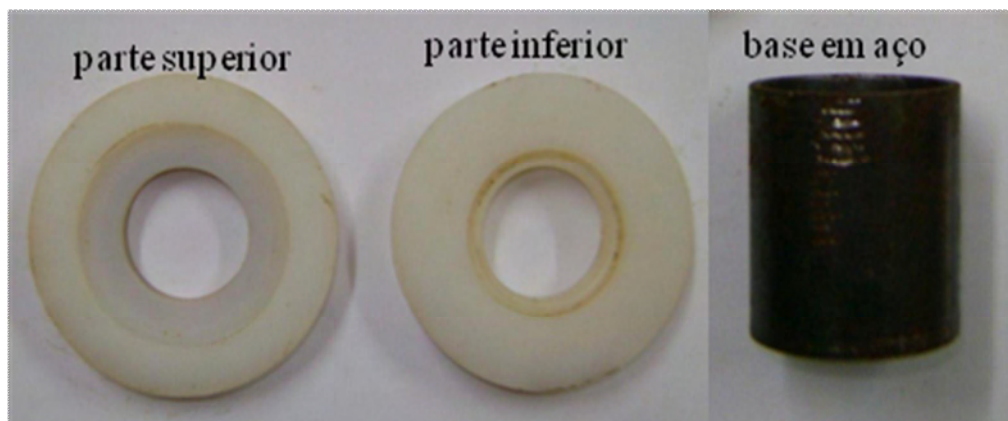


Figura 3.8 Representação dos moldes para o ensaio cíclico.

Para o ensaio cíclico utilizou-se a mesma geometria do ensaio estático. No entanto, a bainha de cimento foi posicionada de modo a ficar centrada em relação ao tubo de aço, conforme Figura 3.9.

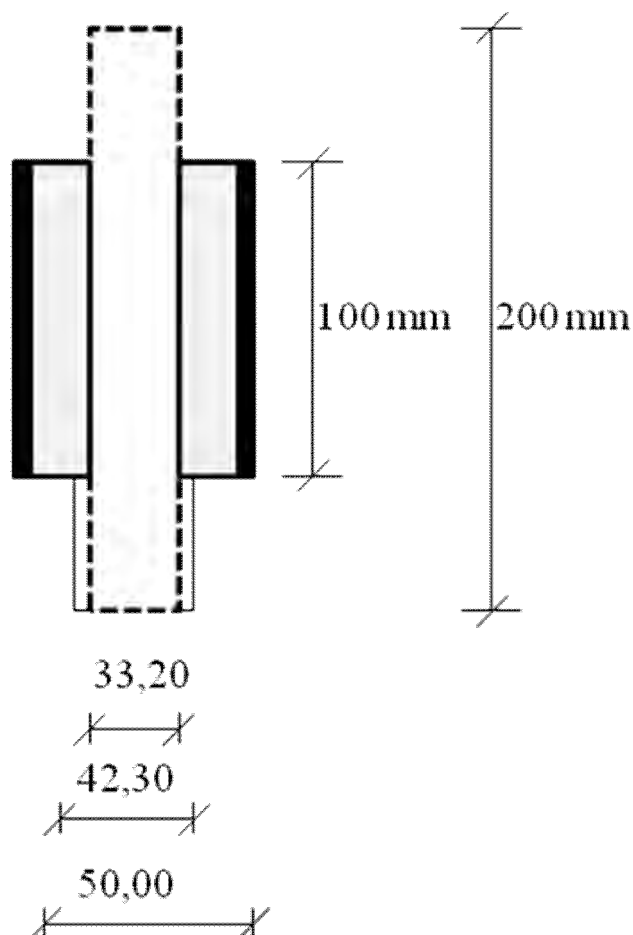


Figura 3.9 Geometria para o ensaio cíclico.

3.3.2.2 Ensaio dinâmico

O ensaio dinâmico consistiu-se da aplicação de deslocamentos longitudinais cíclicos senoidais na extremidade do tubo de aço revestido por uma camada de pasta de cimento, e da medição das deformações no tubo e, simultaneamente, na superfície externa da pasta de cimento. Na Figura 3.9 apresenta-se a geometria para o ensaio cíclico.

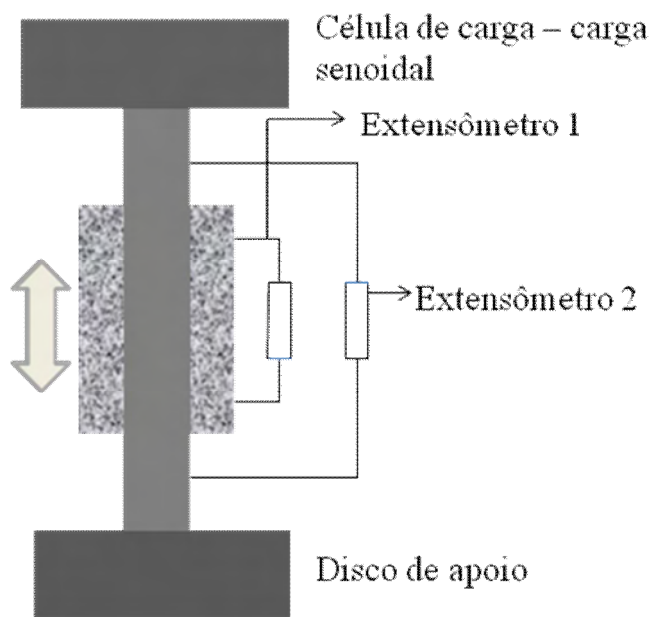
Para garantir que a amostra estaria submetida a uma tensão no regime elástico, aplicou-se uma pré carga estática de 1kN, marcando o limite inferior da força senoidal, a qual foi acrescida 2kN, marcando a amplitude da força senoidal.

A frequência foi imposta de maneira a ser idêntica à velocidade aplicada na etapa 1 (regime estático), cuja velocidade de deslocamento do aço em relação ao revestimento cimentício foi de 0,01 mm/s. Isto porque esta velocidade conduziu a uma maior tensão de aderência no regime estático, o que favorece a obtenção de resultados mesmo em sistemas com condições de contato menos favoráveis. Para garantir o regime elástico, a carga máxima aplicada no ensaio cíclico não excedeu a 10% do valor de carga máxima obtida no ensaio estático. A confirmação deste regime elástico foi obtida através de pré testes com algumas amostras que foram submetidas a ensaios cíclicos, buscando-se observar se a transferência de deslocamento no contato tubo-pasta de cimento, refletida pela variação do deslocamento medido na superfície do revestimento de pasta de cimento, preservaria uma função oscilatória senoidal de amplitude constante por, pelo menos, 10 ciclos.

Na Figura 3.10 tem-se o esquema de ensaio, a força foi medida através da célula de carga situada no topo do tubo, enquanto que os deslocamentos foram medidas com dois LVDTs; sendo um instalado no tubo com 160 mm de altura e o outro colocado na pasta de cimento com 80 mm de altura. Estes foram presos a um anel confeccionado de alumínio, conforme Figura 3.10 (b).

Os extensômetros utilizados possuem sensibilidade de 10^{-3} mm. Eles foram ligados ao sistema de aquisição de dados, onde, pôde-se medir o deslocamento da pasta em relação ao tubo, através da amplitude das ondas do tubo de aço e da pasta de cimento.

A frequência no sistema de aquisição de dados foi tal que, cada ciclo, contivesse 20 (vinte) pontos.



(a)



(b)

Figura 3.10 (a). Representação do ensaio cíclico (b) Corpo-de-prova instrumentado na máquina de ensaio universal Shimadzu Servopulser.

Análise estatística

Foi usado o processo de análise multivariável. Atribuiu-se a significância estatística de 5% de confiabilidade.

A equação 3.3 representa o modelo estatístico utilizado.

$$Y(P_i) = \sum_{i=1}^n K_i P_i + K_0$$

(Equação 3.3)

$Y(P_i)$: é a resposta desejada, variável dependente de interesse;

K_i : constantes das variáveis P_i , obtidas

(P_i) : parâmetros de estudo, variáveis independentes;

n : número de variáveis estudadas;

$[a,b]$: intervalo de variáveis dos parâmetros P_i .

CAPÍTULO IV

4.0 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1 Ensaio estático

Na primeira parte da etapa 1, enfocou-se a variação da velocidade (V), condição de contato (CC) e temperatura de cura (T), com o objetivo de se obter a tensão máxima de aderência por arrancamento. Para etapa 2, adotou-se a melhor velocidade, com a qual se conseguiu a maior tensão de aderência e foram avaliadas as variáveis: idade (I); condição de contato (CC), relação (a/c) e temperatura de cura (T).

4.1.2 Análise visual

Na Figura 4.1 é apresentado o tubo de aço centralizado em relação ao molde de aço e ambos encaixados em uma base de nylon. A parte (b) é referente ao corpo de prova antes do ensaio.

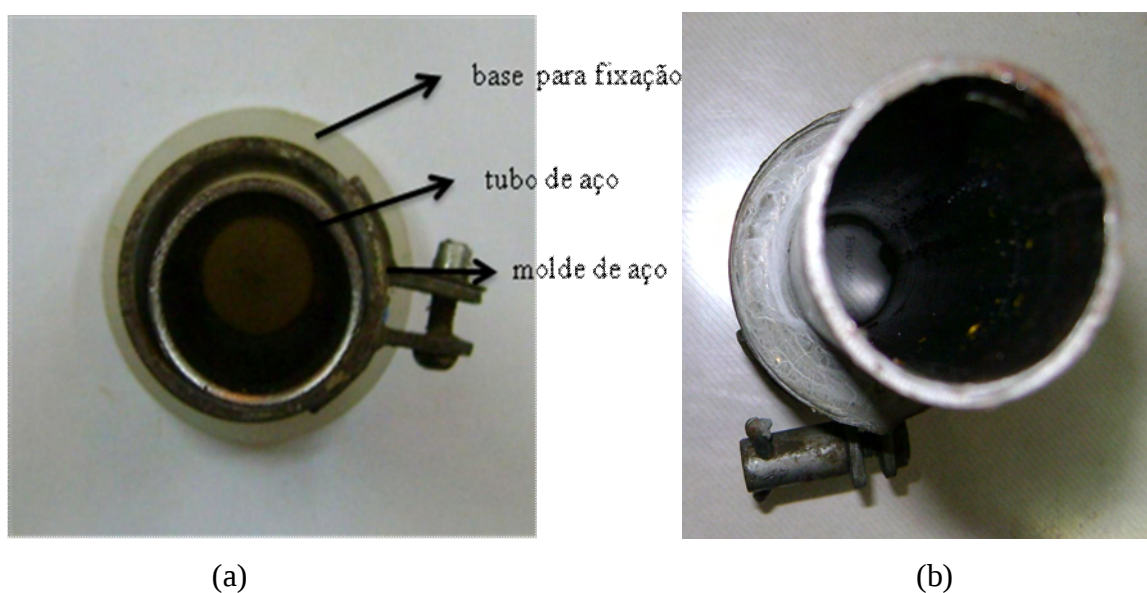


Figura 4.1 (a) Moldes para primeira e segunda etapa (b) corpo-de-prova antes do ensaio.

Observa-se na Figura 4.2 a casca da pasta de cimento, retirada após a realização do ensaio. É possível observar-se que a pasta saiu sem defeito aparente não influenciando nas medidas para cálculo da tensão de aderência.

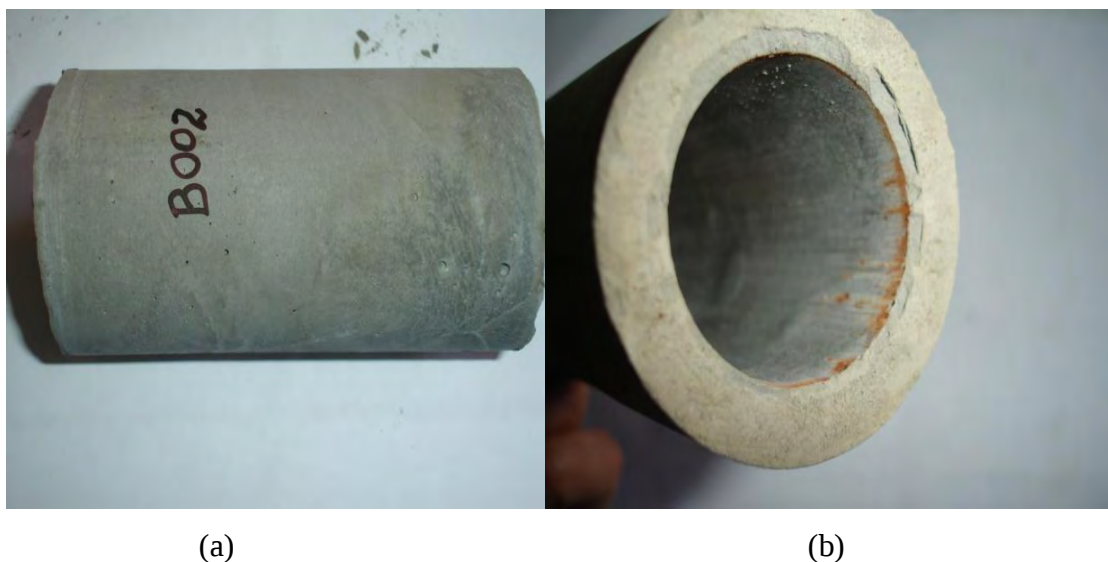


Figura 4.2 Casca de cimento após o ensaio (a) comprimento (b) base.

As Figuras 4.3 e 4.4 apresenta a superfície dos tubos de aço após a realização dos ensaios. Percebe-se que o tubo, quando tratado com óleo, não apresenta pasta de cimento aderida ao mesmo. Para a condição de contato LS (limpo e seco) a superfície fica apenas manchada com pasta. No entanto, para o condição de contato NaCl, o tubo apresenta pasta de cimento aderido, comprovando-se a eficácia dessa condição de contato no o aumento na tensão de aderência.

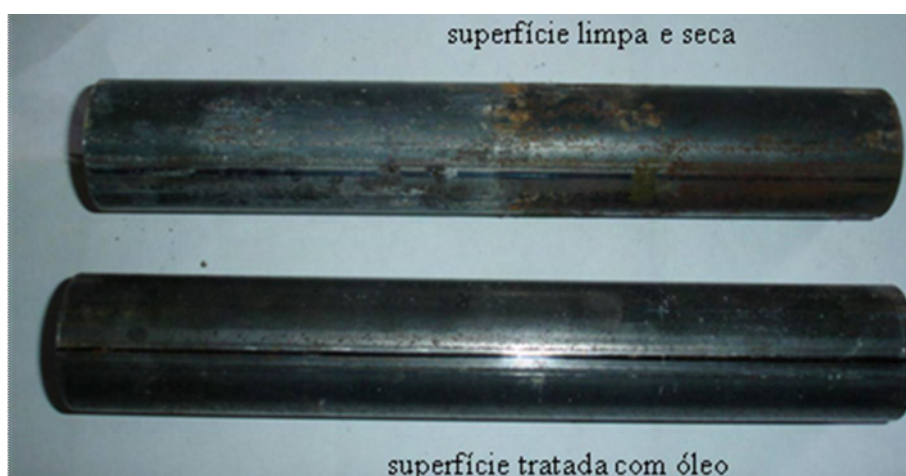


Figura 4.3 Superfície do tubo de aço após o ensaio com condição de contato LS e tubo condição de contato óleo aos sete dias.



Figura 4.4 Superfície do tubo de aço com condição de contato NaCl e com condição de contato óleo aos sete dias.

4.2 Efeito da velocidade de aplicação de carga da condição de contato da relação (a/c) e da temperatura do sistema tubo-pasta de cimento na tensão de aderência

As curvas força deslocamento obtidas no ensaio estático apresentam, em geral, um pico correspondente à máxima tensão de aderência obtida no teste. O comportamento das amostras é praticamente linear, após um pequeno trecho inicial correspondente a acomodações delas no equipamento de realizações dos ensaios.

Foram testadas as condições de contato, a relação (a/c) e a velocidade de aplicação de carga nas temperaturas ambiente e a 60°C.

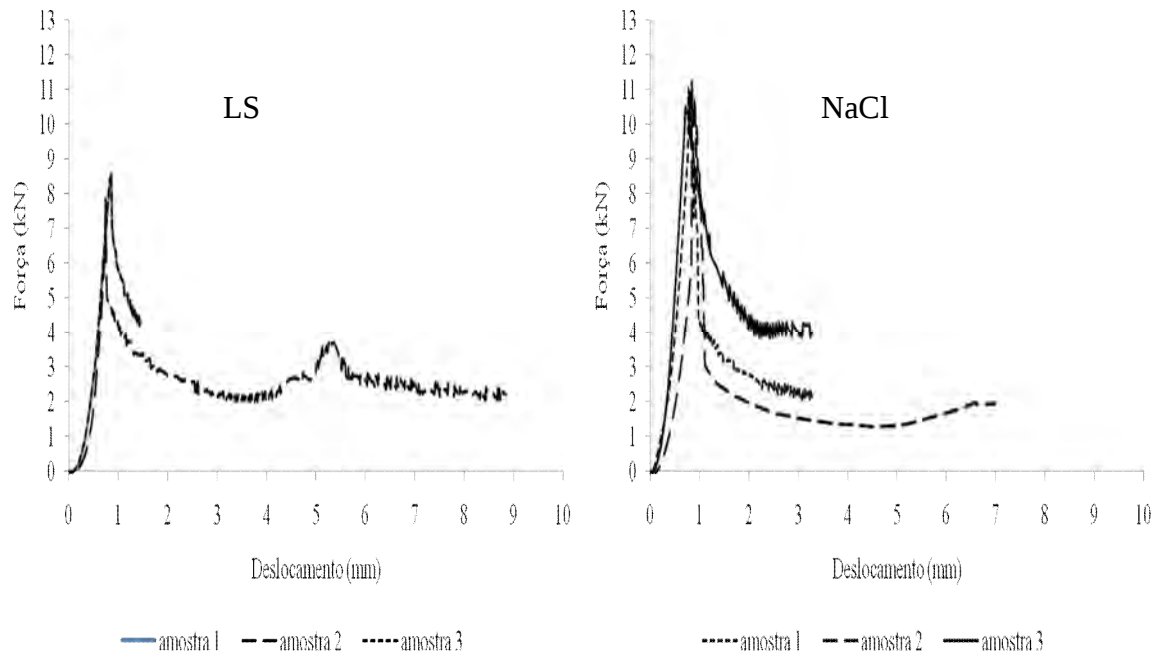
4.2.1 Temperatura ambiente

Na Figura 4.5, são apresentadas perfis típicos das curvas provenientes dos ensaios de aderência por arrancamento para velocidade de aplicação de carga 0,01 mm/s para relação (a/c) 0,44 e 0,60 e as condições de contato utilizadas. Para relação (a/c) 0,44 a média do deslocamento no pico do gráfico para condição de contato LS foi de 0,79 mm e para NaCl, no pico 0,81mm.

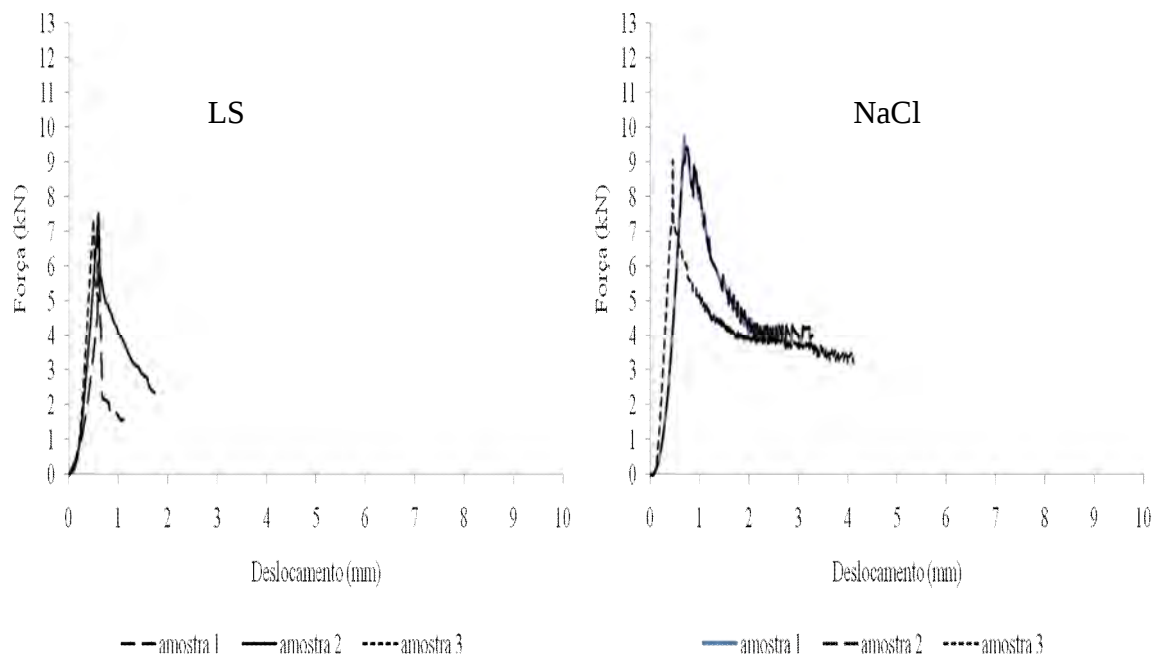
Para relação (a/c) 0,60 o deslocamento médio com a condição LS foi de 0,57 mm e com a condição de contato NaCl foi de 0,64 mm.

Nota-se então, que para velocidade 0,01 mm/s :

- Tubo mais rugoso aumentou o deslocamento correspondente ao pico do gráfico
- O deslocamento no pico diminui com a relação (a/c)



(a)



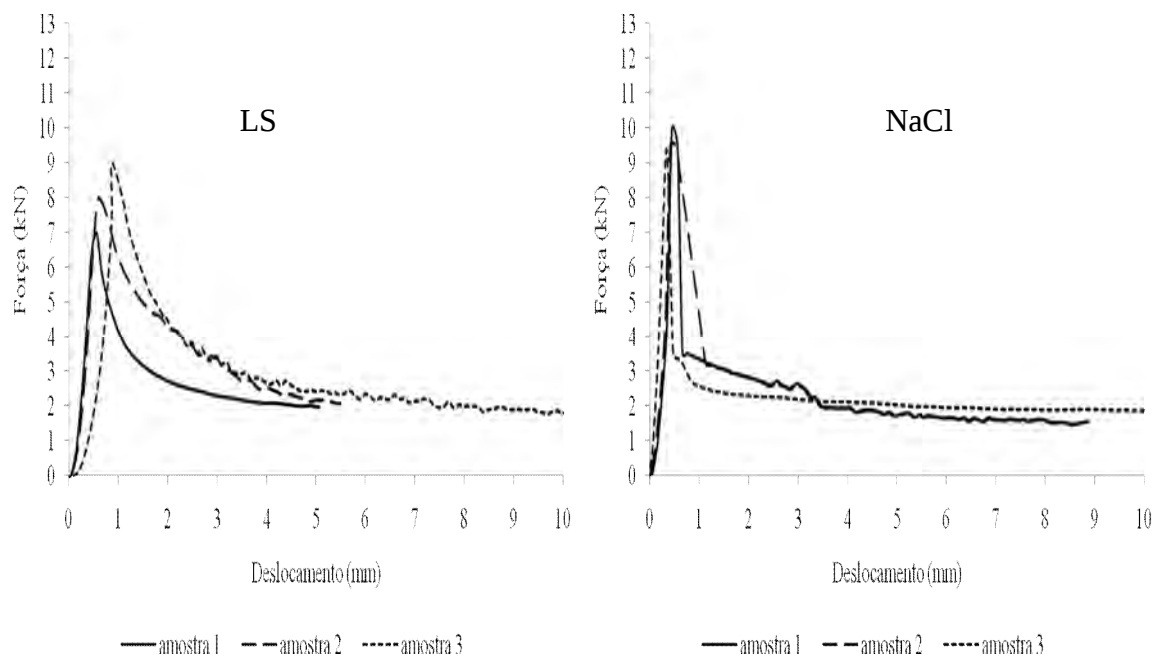
(b)

Figura 4.5 Curva força versus deslocamento para velocidade 0,01 mm/s em temperatura ambiente. (a) relação (a/c) 0,44 (b) relação (a/c) 0,60.

Na Figura 4.6 verifica-se a relação força versus deslocamento para velocidade de aplicação de carga 0,1 mm/s. Para relação (a/c) 0,44 e a condições de contato LS o deslocamento foi de 0,60 e para condição NaCl foi de 0,66 mm.

Para relação (a/c) 0,60 com a condição de contato LS o deslocamento médio foi de 0,48 mm e para condição NaCl foi de 0,62 mm.

As mesmas observações anteriores permaneceram válidas para este caso. Nota-se que a maior velocidade fez diminuir o deslocamento do pico.



(a)

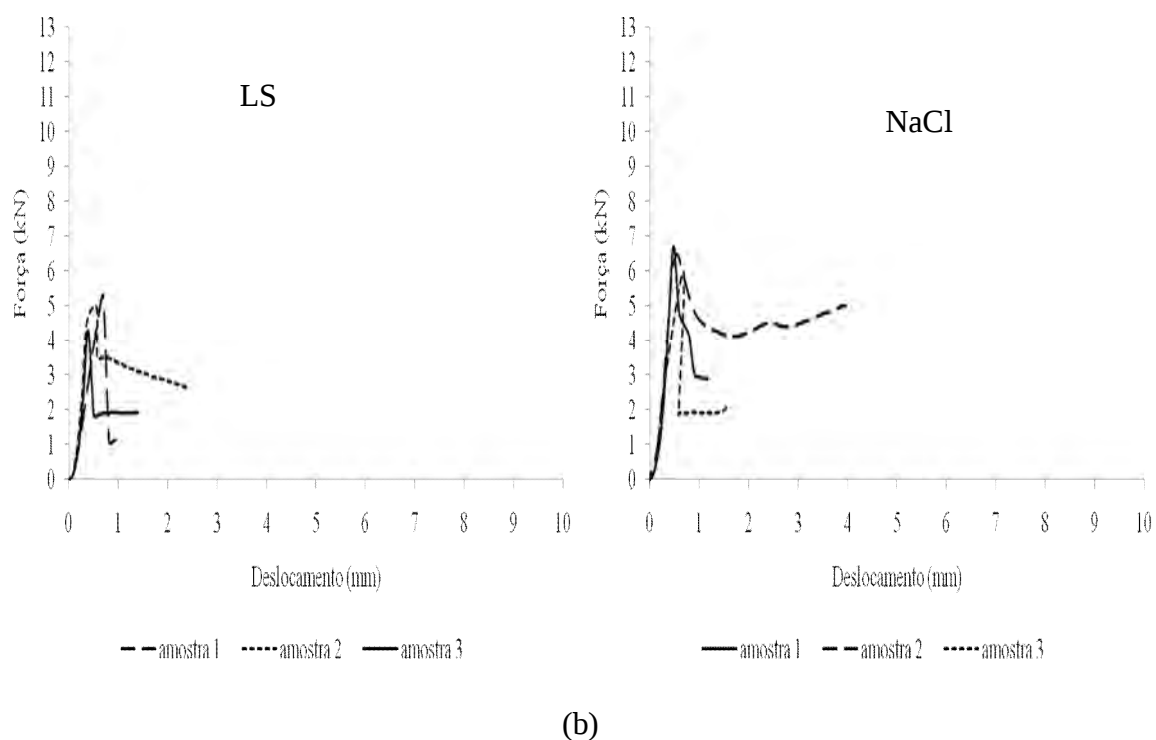


Figura 4.6 Curva força versus deslocamento para velocidade 0,1 mm/s em temperatura ambiente (a) relação (a/c) 0,44 (b) relação (a/c) 0,60.

Na Figura 4.7 tem-se o caso em que a velocidade de carga foi de 1 mm/s. Nota-se que a forma dos gráficos muda um pouco, desaparecendo o pico acentuado nas curvas. Os deslocamentos correspondentes à tensão de aderência máxima aumentaram significativamente.

Para a relação (a/c) 0,44 e a condição de contato LS o deslocamento médio foi de 1,51 mm e para condição NaCl ficou em 1,58 mm.

Para relação (a/c) 0,60 com LS o deslocamento médio foi de 1,70 mm enquanto para o NaCl foi de 1,71 mm.

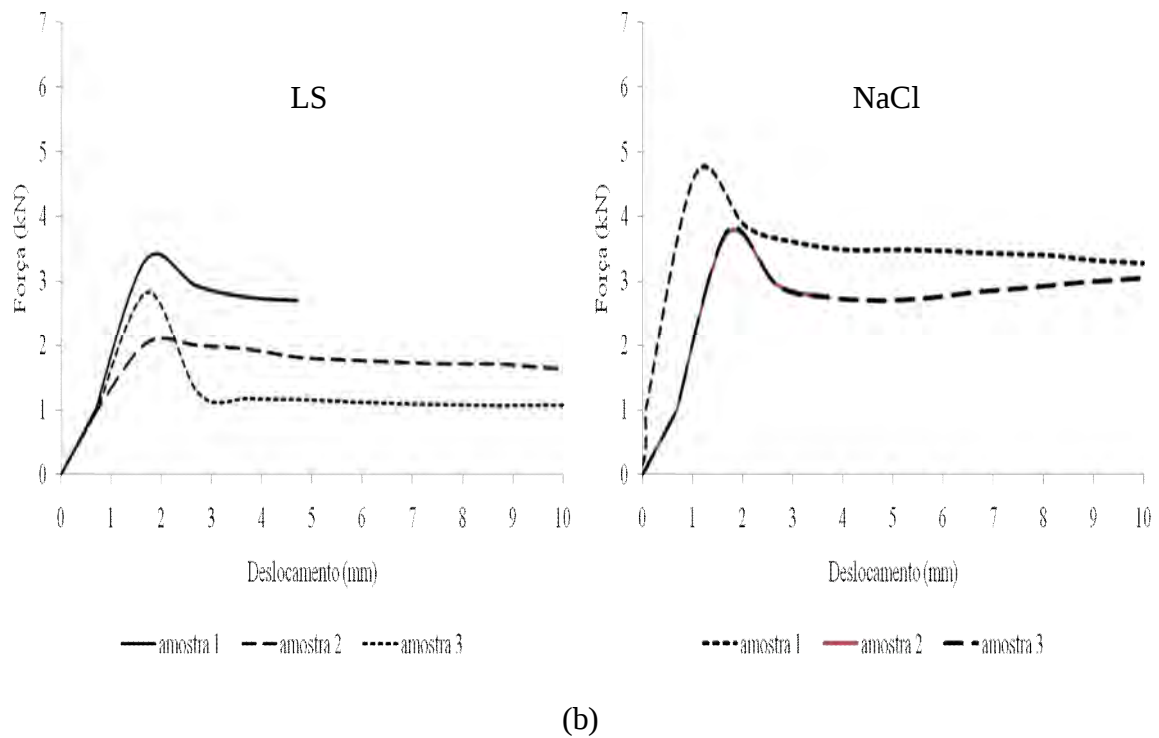
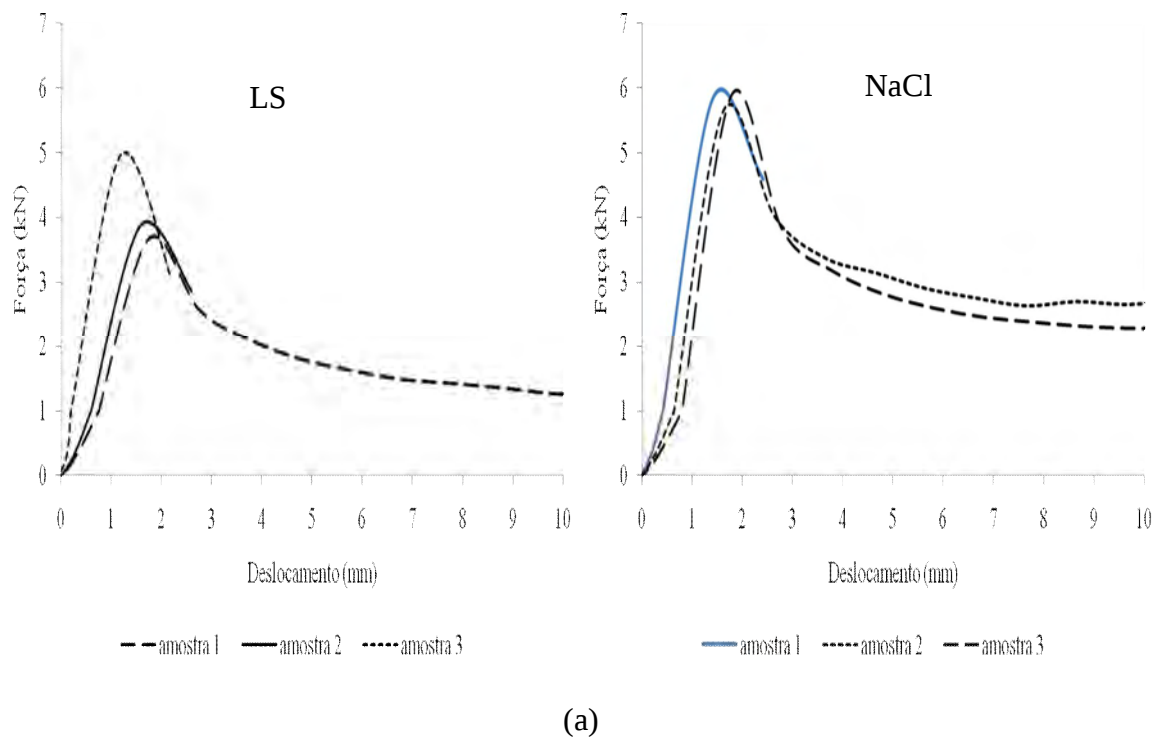


Figura 4.7 Curva força versus deslocamento para velocidade 1 mm/s em temperatura ambiente (a) relação (a/c) 0,44 (b) relação (a/c) 0,60.

Na Tabela 4.1 tem-se o resumo da média de três ensaios da tensão de aderência, para os relações (a/c) 0,44 e 0,60, à temperatura de cura ambiente com relação as velocidades 0,01 mm/s, 0,1 mm/s e 1 mm/s de aplicação de carga.

Tabela 4.1 Resumo da tensão de aderência a temperatura ambiente.

Velocidade de carga (mm/s)	Condição de contato	Relação (a/c)	Tensão de aderência média (kPa)
0,01	LS	0,44	830±0,25
0,01	NaCl	0,44	1045±0,25
0,1	LS	0,44	768±0,32
0,1	NaCl	0,44	921±0,56
1	LS	0,44	400±0,25
1	NaCl	0,44	556±0,29
0,01	LS	0,60	693±0,38
0,01	NaCl	0,60	894±0,25
0,1	LS	0,60	463±0,55
0,1	NaCl	0,60	614±0,25
1	LS	0,60	262±0,25
1	NaCl	0,60	334±0,25

Na Figura 4.8 é apresentada a tensão de aderência em relação às velocidades estudadas à temperatura ambiente para a condição de contatos LS e NaCl, com as relações (água/cimento) 0,44 e 0,60. Evidencia-se que houve decréscimo na tensão de aderência à medida que aumentou a velocidade de aplicação de carga e a relação (a/c) e acréscimo na tensão de aderência quando utilizou a condição de contato NaCl. Os melhores resultados são observados para velocidade 0,01 mm/s tanto para condição de contato LS como para NaCl.

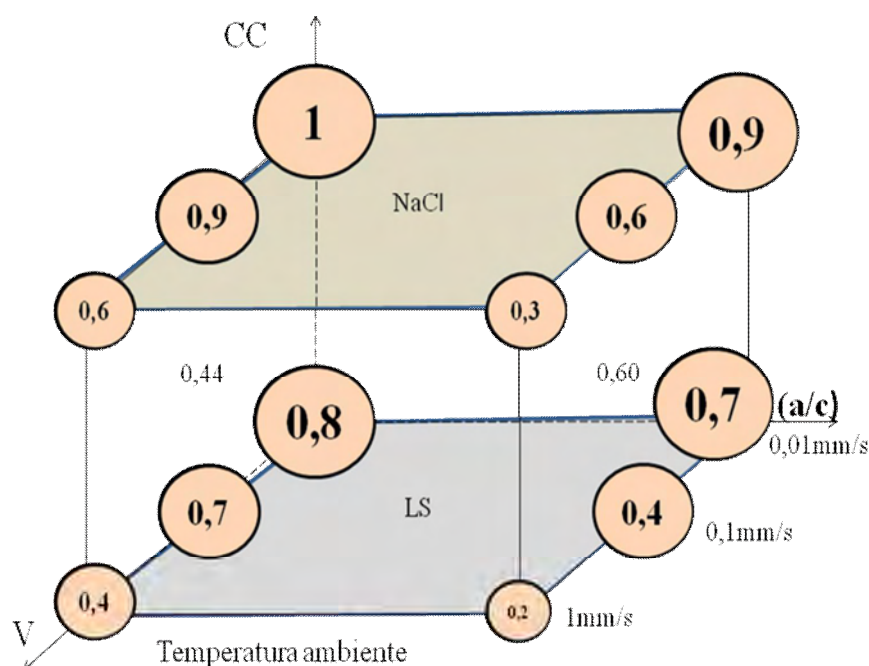


Figura 4.8 Velocidade de aplicação de carga versus relação (a/c) versus condição de contato a temperatura ambiente.

4.2.2 Temperatura 60 °C

Na Figura 4.9, são apresentadas os perfis das curvas provenientes dos ensaios de arrancamento para velocidade de aplicação de carga 0,01 mm/s para relação 0,44 e 0,60 e as condições de contato citadas anteriormente. Para relação (a/c) 0,44 a média do deslocamento para condição de contato LS ficou em 0,60 mm e para NaCl ficou em 0,65mm.

Para relação (a/c) 0,60 o deslocamento médio com a condição LS foi de 0,52 mm e com a condição de contato NaCl foi de 0,54 mm.

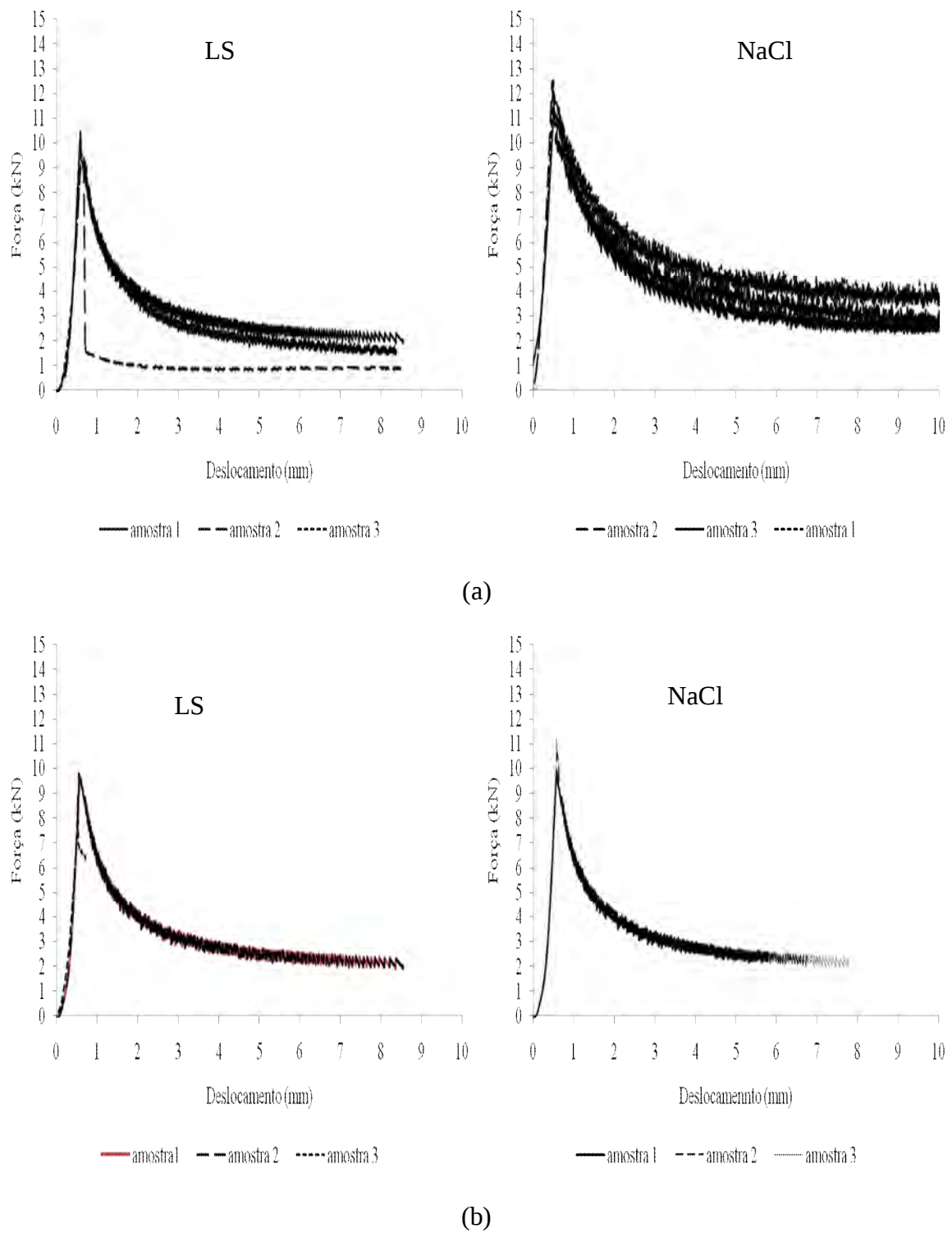
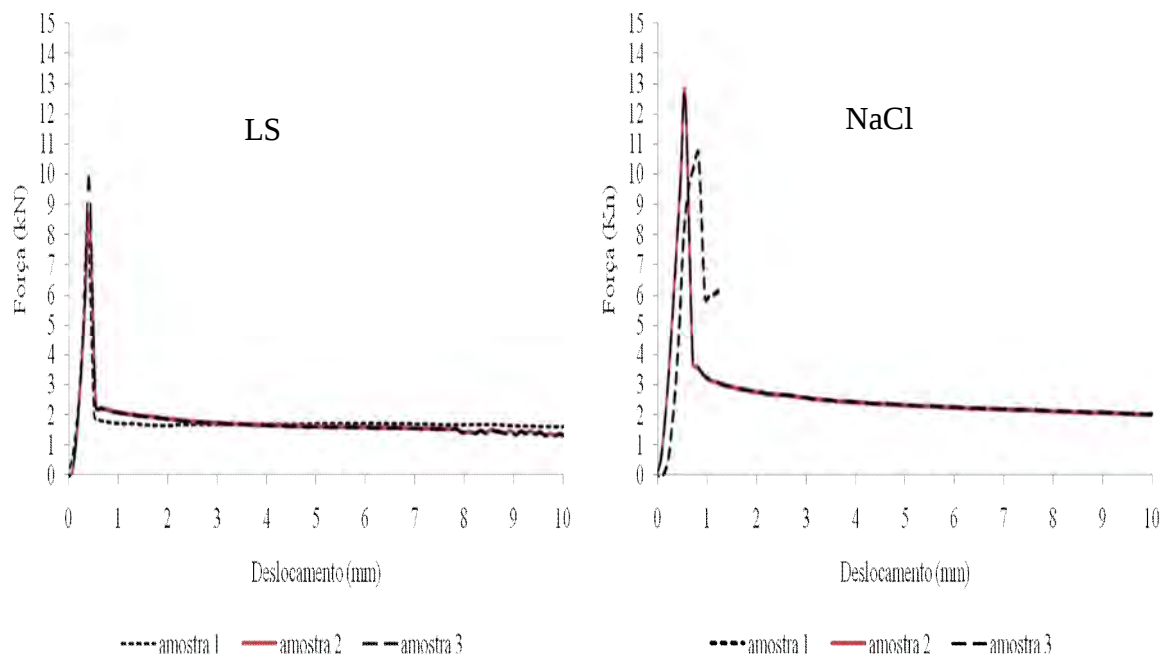


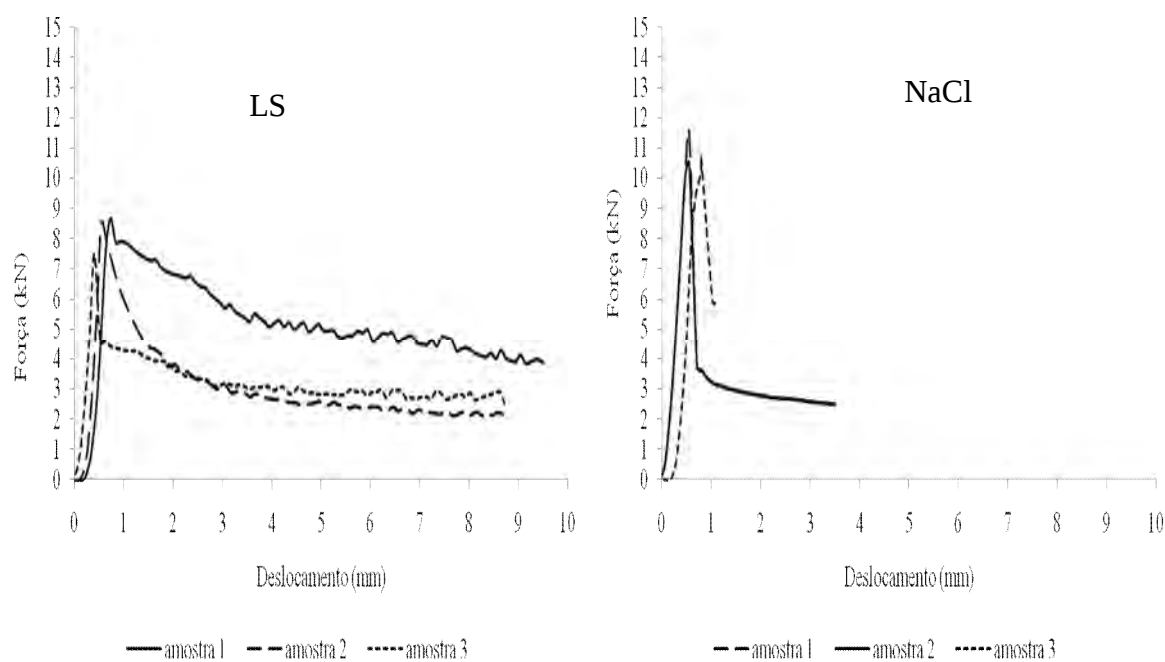
Figura 4.9 Curva força versus deslocamento para velocidade 0,01 mm/s à temperatura 60 °C. (a) relação (a/c) 0,44 (b) relação (a/c) 0,60.

Na Figura 4.10 verifica-se a relação força versus deslocamento para velocidade de aplicação de carga 0,1 mm/s. Para relação (a/c) 0,44 e a condições de contato LS o deslocamento foi de 0,38 mm e para condição NaCl ficou em 0,58 mm.

Para relação (a/c) 0,60 com a condição de contato LS o deslocamento médio foi de 0,36 mm e para condição NaCl foi de 0,57 mm.



(a)



(b)

Figura 4.10 Curva força versus deslocamento para velocidade 0,1 mm/s à temperatura 60 °C. (a) relação (a/c) 0,44 (b) relação (a/c) 0,60.

Na Figura 4.11 verifica-se a relação força versus deslocamento para velocidade de aplicação de carga 1 mm/s. Para a relação (a/c) 0,44 e a condição de contato LS o deslocamento médio foi de 1,47 mm e para condição NaCl ficou em 1,50 mm.

Para relação (a/c) 0,60 com a condição de contato LS 1,50 mm e para condição NaCl o deslocamento médio foi de 1,52 mm.

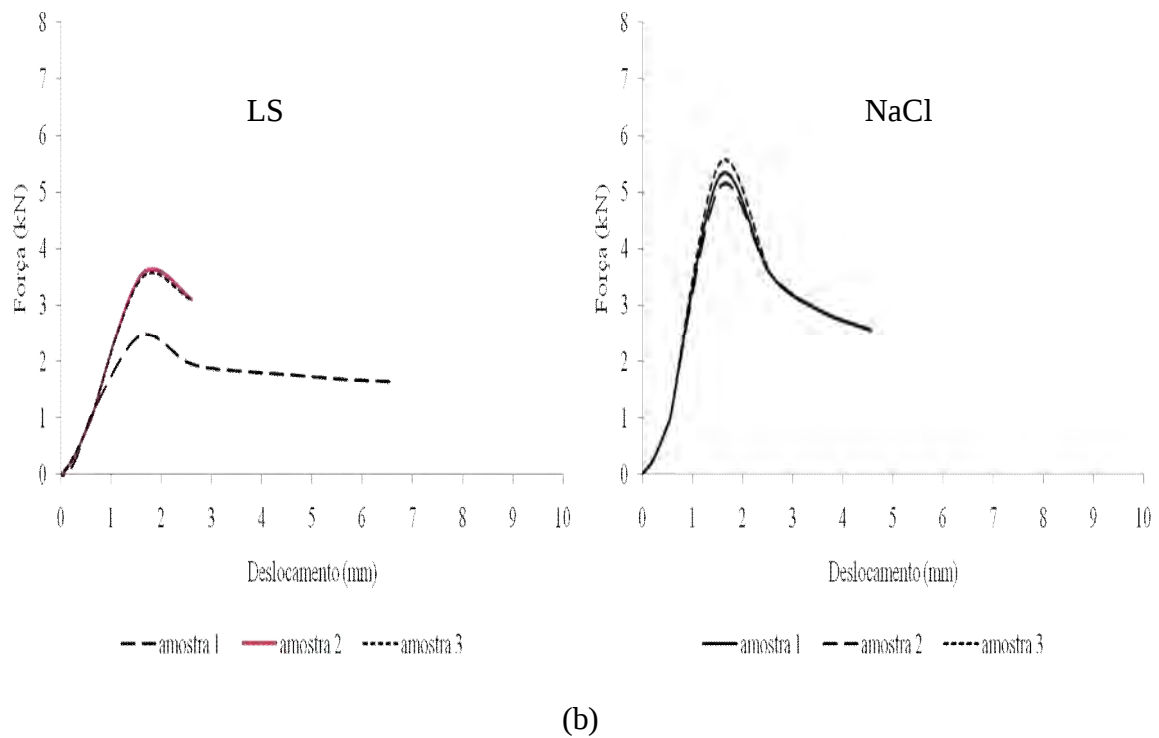
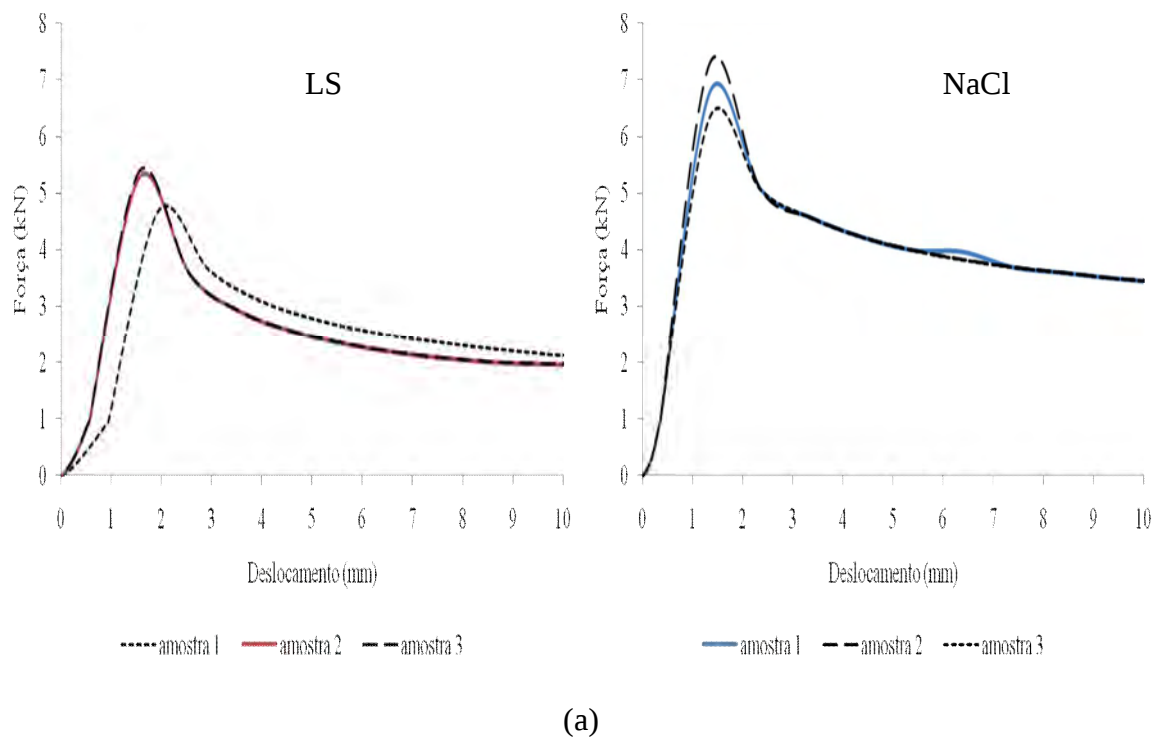


Figura 4.11 Curva força versus deslocamento para velocidade 1 mm/s a temperatura à 60 °C. (a) relação (a/c) 0,44 (b) relação (a/c) 0,60.

A Tabela 4.2 apresenta o resumo das médias de três ensaios das tensões de aderência, para as relações (a/c) 0,44 e 0,60, à temperatura de cura controlada a 60 °C, com relação as velocidades: 0,01 mm/s, 0,1 mm/s e 1 mm/s.

Tabela 4.2 Resumo da tensão de aderência a temperatura de cura controlada 60 °C.

Velocidade de carga (mm/s)	Condição de contato	Relação (a/c)	Tensão de aderência média (kPa)
0,01	LS	0,44	979±0,25
0,01	NaCl	0,44	1284±0,55
0,1	LS	0,44	813±0,25
0,1	NaCl	0,44	1155±0,25
1	LS	0,44	455±0,25
1	NaCl	0,44	654±0,25
0,01	LS	0,60	961±0,25
0,01	NaCl	0,60	1217±0,25
0,1	LS	0,60	771±0,28
0,1	NaCl	0,60	1082±0,25
1	LS	0,60	306±0,25
1	NaCl	0,60	500±0,25

Na Figura 4.12 é apresentado a tensão de aderência em relação às velocidades de carga aplicada à temperatura de 60 °C com as relações 0,44 e 0,60. para as condições de contato LS e NaCl. A mesma tendência pode ser observado para verificação da velocidade à temperatura ambiente, ou seja:

- i) decréscimo na tensão de aderência a medida que aumentou a velocidade de aplicação da carga;
- ii) com aumento na relação (a/c) dcrécimo na tensão de aderência;
- iii) acréscimo a medida que utilizou a condição de contato NaCl.

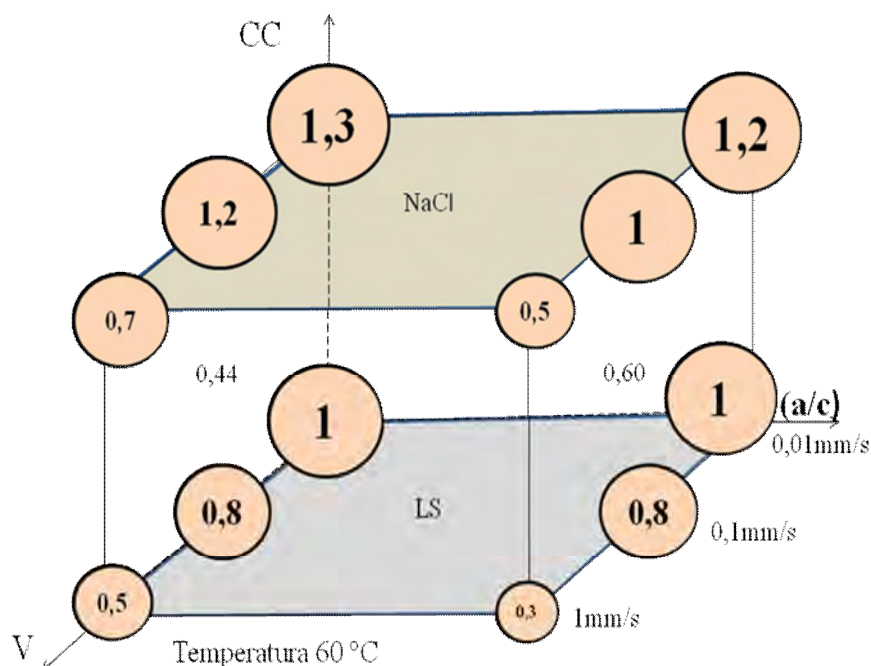


Figura 4.12 Velocidade de aplicação de carga versus relação (a/c) versus condição de contato à temperatura 60 °C.

Análise estatística

Certamente o número elevado de variáveis, suas naturezas quantitativas e qualitativas e suas interações tornam as análises de efeitos isolados bastante complexas. Importante se faz, portanto, a realização da significância estatística multivariável, incluindo todos os parâmetros do planejamento experimental e avaliando a significância estatística desses parâmetros e suas interações com a tensão de aderência.

As curvas apresentadas nas Figuras 4.13 e 4.14, representam a tensão de aderência (σ) em função das variáveis estudadas, sendo a Figura 4.18, para a condição de contato LS (limpo e seco) e a Figura 4.19, para NaCl. Estas foram construídas a partir do modelo estatístico contendo as variáveis significativas, obtidas através do método dos mínimos quadrados, como pode ser observado na equação 4.1. Nela a condição de contato LS corresponde a (-1) e a NaCl (+1).

$$\begin{aligned} \tau_b(kPa) = & 1143,74 - 562,55(vel)_{[0,01;0,1;1]} \\ & + 134,75(condição\ de\ contato)_{[-1,+1]} - 612,25\left(\frac{a}{c}\right)_{[0,44;0,60]} \\ & + 3,85(temp)_{[30;60]} \end{aligned}$$

(Equação 4.1)

$$\begin{aligned} [R^2 = 0,88] \quad [F = 123,31] \quad Prob\,t(vel) = 0.0001 \quad Prob\,t(trat) = 0.0001 \quad Prob \\ t\left(\frac{a}{c}\right) = 4,58605 E - 4 \quad Prob\,t(temp) = 0.0001 \end{aligned}$$

A equação 4.1 é a equação que melhor representa as variáveis estudadas, ela atesta o encontrado nos ensaios experimentais, ou seja aumento da velocidade e da relação (a/c) diminuição na tensão de aderência. Condição de contato NaCl presente no tubo aumenta a tensão de aderência.

Para equação (4.1) é possível identificar que todos os t-Student ótô são significativos, ou seja, todos os valores são menores que 0,05. O coeficiente de Fisher óFô, indica que a qualidade do modelo global é significativo para um grau de 95%, com um valor de 123,31 e, sendo $F > 0,01$, isto indica que se deve aceitar a hipótese da presença do efeito conjunto da velocidade, condição de contato, relação (a/c) e temperatura.

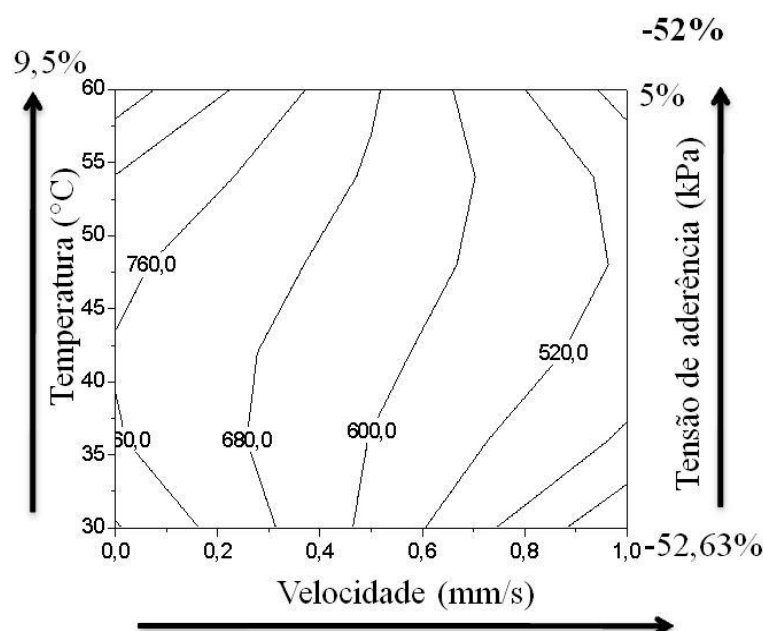


Figura 4.13 Tensão de aderência em função da velocidade e da temperatura para condição de contato LS (limpo e seco).

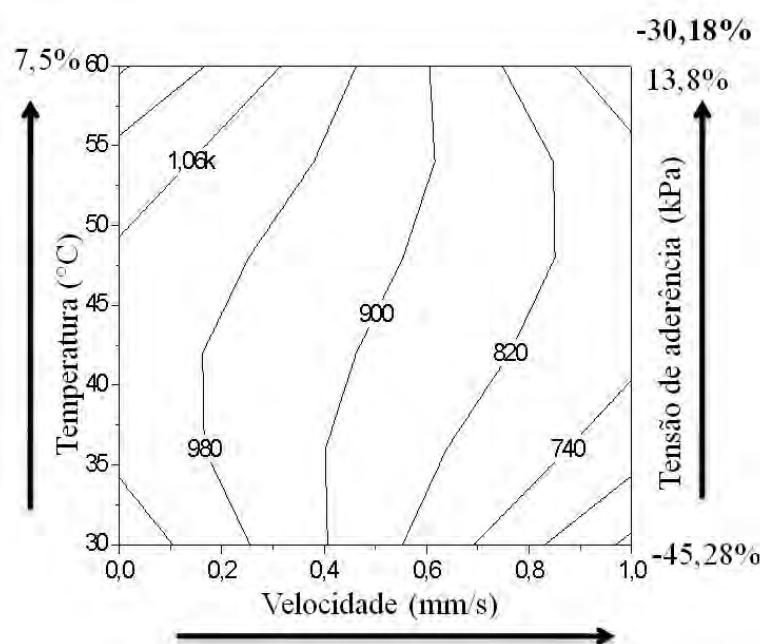


Figura 4.14 Tensão de aderência em função da velocidade e da temperatura para condição de contato NaCl (cloreto de sódio).

As equações 4.2 e 4.3 representam a correlação entre as variáveis estudadas. A equação 4.2 representa a combinação entre as variáveis condição de contato e velocidade. Quando se compara a condição de contato LS com a NaCl é evidência que com a condição NaCl há aumento na tensão de aderência. Na variável velocidade à medida que se aumentou a velocidade houve diminuição da tensão de aderência.

$$\tau b(kPa) = 998,60 + 134,75(\text{condição de contato})_{[-1,+1]} - 562,55(vel)_{[0,01;0,4;1]}$$

$$\tau b(kPa) = 1 + \begin{bmatrix} 0,13 \\ 1,13 \end{bmatrix} (\text{condição de contato}) - \begin{bmatrix} 0,55 \\ 0,56 \\ 1,56 \end{bmatrix} (vel)$$

(Equação 4.2)

$$[R^2 = 0,82] [F = 159,83] \text{ Prob } t(\text{condição de contato}) = 0.0001$$

$$\text{Prob } t(vel) = 0.0001$$

A equação 4.3 representa a combinação entre velocidade e relação (a/c). É evidente que existe efeito combinado entre a velocidade de aplicação de carga e a relação (a/c)

$$\tau_b(kPa) = 998,60 - 1081,41 \left(vel \times relação \left(\frac{a}{c} \right) \right)_{[0,01;0,1;1 \times 0,44;0,60]}$$

$$\tau_b(kPa) = 1 - 1,08 \left(vel \times relação \left(\frac{a}{c} \right) \right)$$

(Equação 4.3)

$$[R^2 = 0,66] [F = 138,3] Prob t \left(vel \times relação \left(\frac{a}{c} \right) \right) = 0,0001$$

Efeito da velocidade de aplicação da carga

As evidências experimentais e a análise estatística confirmam a significância dos efeitos da velocidade de aplicação de carga, da condição de contato, da temperatura e da relação (a/c) com a tensão de aderência.

As observações indicam que a velocidade afeta negativamente a resistência da aderência do sistema tubo- pasta de cimento. No entanto, em concretos, maiores velocidades de ensaio conduzem a maiores valores de resistência à compressão (NEVILLE, 1997; METHA e MONTEIRO, 2008). O aumento da velocidade da aplicação da carga nos ensaios de compressão altera as características de propagação de trincas na matriz cimentícia, sobrevalorizando o valor da resistência medida. No ensaio de aderência quanto menor a velocidade maior será a tensão de aderência.

Em geral, pode-se notar que o aumento da velocidade de aplicação da carga atua negativamente em relação a todos os outros parâmetros estudados a saber: condição de contato, teor de água cimento, temperatura.

Relação (a/c)

De acordo com METHA e MONTEIRO (2008), do ponto de vista da resistência a relação água/cimento-porosidade é indiscutivelmente o fator mais importante porque independentemente de outros fatores, ela afeta a porosidade tanto a matriz da pasta de cimento como da zona de transição entre matriz e agregado graúdo; no caso do sistema tubo pasta de cimento, a observação de que o aumento da relação (a/c) promove uma diminuição da tensão de aderência indica que o material que promove a resistência do contato é cimentício, uma vez que a relação (a/c), da matriz também proporcionou o

enfraquecimento do contato, provavelmente devido as mesmas razões que explicam esse efeito na matriz cimentícia, ou seja, o aumento da porosidade. Portanto, as evidências sugerem que o elemento do contato responsável pela ancoragem da pasta de cimento e o tubo metálico é de natureza cinética, portanto, obedecendo a lei de Abrahams.

Condição de contato

Obviamente, sendo este contato de natureza cimentícia, neste caso contendo produtos de hidratação do cimento Portland, os produtos existente pelas diferentes condições de contato refletem o comportamento observado. O aumento da tensão de aderência referente a condição de contato contendo NaCl, seguidos de valores menores para tubos secos pode ser explicado a partir da reatividade química de cada componente com o cimento. No caso dos contatos contendo NaCl, que apresentaram maiores aderências, mesmo variando-se todas as outras variáveis, as espécies iônicas deste sal são conhecidas por acelerarem a hidratação do cimento, aumentando assim a sua resistência em pequenas idades. Outro aspecto importante é de os íons de cloro atuam cataliticamente no processo de corrosão da tubulação metálica, causando a corrosão do mesmo. Isto cria uma camada superficial mais áspera melhorando a aderência. Combinando-se as duas formas de atuação do cloro neste sistema, o aumento da aderência foi maior pela sua reatividade na interface tubo-cimento do que pela interação gerada pela variação dos outros fatores estudados.

A longo prazo, a transformação do aço em óxidos de ferro é acompanhada por uma aumento no volume o qual, dependendo do estado de oxidação, pode ser de até 600 por cento do metal original. Acredita-se que esse aumento de volume possa causar expansão e fissuração do sistema tubo-pasta de cimento se os íons de cloro não se combinarem com outros íons provenientes do cimento, como por exemplo os sais de Friedel, e então esta expansão seria mitigada desde que este sal permaneça estável (METHA e MONTEIRO, 2008). No entanto, para o caso da aderência a corrosão foi benéfica.

Efeito da temperatura

Assim como a reatividade química da superfície de contato atua na hidratação e nas condições de ancoragem do cimento no tubo, o aumento de temperatura pode ter

contribuído com o aumento da tensão de aderência, possivelmente, (i) devido ao aumento volumétrico do tubo que pressiona a cimentação contra o cilindro aumentando a aderência entre o tubo de aço e a cimentação e (ii) pelo aumento da cinética da hidratação do cimento, aumentando assim a resistência do material cimentício do contato. É importante ressaltar que certos sais contendo cloro e alguns aluminatos hidratados do cimento sofrem alterações nas suas estruturas em temperaturas superiores a 60 °C, fazendo com que as análises em pequenas idades não representem o comportamento estrutural de sistemas tubo-pasta de cimento em longas idades. No estudo em questão, as pequenas idades servem para entender a estratégia utilizada na prática dos poços de petróleo de colocá-los em operação com apenas horas após a cimentação.

4.3 Efeito da condição de contato da relação (a/c) da idade da temperatura do sistema tubo-pasta de cimento na tensão de aderência

Nesta etapa optou-se por usar apenas a velocidade de 0,01 mm/s, porque foi ela que conduziu a uma melhor tensão de aderência.

A Tabela 4.3 é referente, a média de três ensaios para tensão de aderência com velocidade constante de 0,01 mm/s para relação (a/c) 0,33, e 0,44, idade de 1 dia, três condições de contato: óleo, LS (limpo e seco) e NaCl e temperatura de cura controlada a 30 °C e a 60 °C.