

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo estão transcritos as principais informações extraídas de diversos trabalhos experimentais pesquisados e que orientaram sobre o comportamento de conexões compostas de tubos de aço-carbono concêntricos e preenchimento do espaço anular entre eles com argamassa de cimento, quando submetido aos esforços axiais de compressão.

Os trabalhos pesquisados serviram como parâmetros de comparação dos resultados dos modelos numéricos criados aqui e auxiliaram no entendimento do comportamento das conexões de reparo e no detalhamento da forma como é feita a transmissão dos esforços do duto para a luva e da ocorrência da resistência ao escorregamento, e o próprio escorregamento, entre as superfícies aço-argamassa.

2.1.Reparo em dutos

A técnica adotada para o reparo de dutos é a de dupla calha com enchimento, que consiste em envolver o trecho corroído com uma luva de diâmetro interno maior que o diâmetro externo do duto, promovendo um espaço anular entre o duto e a calha onde se injeta, sob pressão, resina epoxídica ou outro material similar. A quantificação da diferença entre os diâmetros, ou seja a espessura do espaço anular foi estudada por Yamasaki (1974) que concluiu que quanto menor essa espessura melhor é o desempenho da dupla calha.

O desenvolvimento de um compósito a ser formulado para o reforço estrutural de dutos e das técnicas de aplicação deve objetivar atender as mais diversas características físicas e geométricas dos dutos, obedecendo aos limites estabelecidos pela ASME B31.4.

A principal desvantagem da técnica de dupla calha com enchimento é que, uma vez que se exige a construção de um molde com dimensões precisas, a técnica não é suficientemente rápida.

2.2. Estudos preliminares sobre conexões de reparo

2.2.1. Análise das Tensões Principais em Dutos

As tensões principais (σ_{xx} , σ_{yy} e σ_{zz}) na superfície externa de um vaso cilíndrico estão ilustradas no elemento de tensão da Figura 2.1.

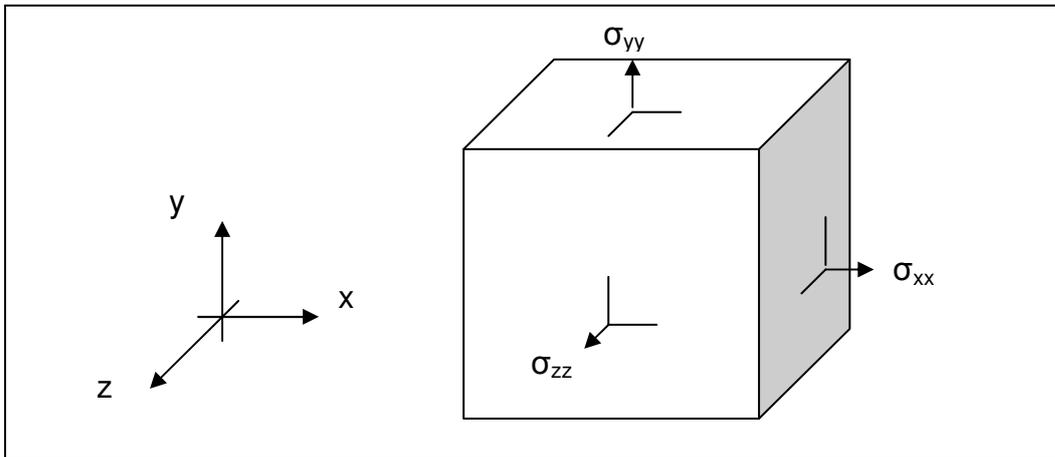


Figura 2.1 – Esquemático do sistema de direção de tensões em um elemento.

As tensões de cisalhamento máximas no plano ocorrem em planos que estão rotacionados a 45° sobre o eixo z . As tensões de cisalhamento máximas fora do plano ocorrem em planos que estão rotacionados a 45° sobre os eixos x e y ; essas tensões são

$$(\tau_{\max})_z = (\sigma_{yy} - \sigma_{xx})/2 = p.r/4t \quad (\text{no plano}) \quad (2.1)$$

$$(\tau_{\max})_y = \sigma_{xx}/2 = p.r/2t \quad \text{e} \quad (\tau_{\max})_x = \sigma_{yy}/2 = p.r/4t \quad (\text{fora do plano}) \quad (2.2)$$

Comparando os resultados anteriores, tem-se que a tensão cisalhante máxima absoluta é a tensão que ocorre em um plano que foi rotacionado a 45° sobre o eixo x :

$$\tau_{\max} = \sigma_{xx}/2 = p.r/2t \quad (2.3)$$

As tensões principais na superfície interna da parede do vaso cilíndrico são

$$\sigma_{yy} = p.i.r/t \quad \sigma_{xx} = p.i.r/2t \quad \sigma_{zz} = -p.i \quad (\text{diferente de zero}) \quad (2.4)$$

Conforme discutido na literatura (Gere,2003), nas deduções de formulações sobre vasos cilíndricos de parede fina, é desconsiderada a presença da tensão de

compressão na direção z . Uma vez que a terceira tensão principal (agindo na direção z) é pequena, mas diferente de zero, o elemento está em tensão biaxial. Essa tensão de compressão varia de π na superfície interna até zero na superfície externa. Com essa aproximação, as tensões na superfície interna tornam-se as mesmas que nas superfícies externas (tensão biaxial).

Fazendo a análise de um bombeio de produtos em um duto é observada a geração de uma força F que provoca um carregamento longitudinal (σ_{xx}), circunferencial (σ_{yy}) e radial (σ_{zz}) nas paredes do duto. As direções dos planos dessas tensões principais são coincidentes com a direção radial, circunferencial e longitudinal do tubo (estado triaxial), considerando que o mesmo não está sob a ação de torção.

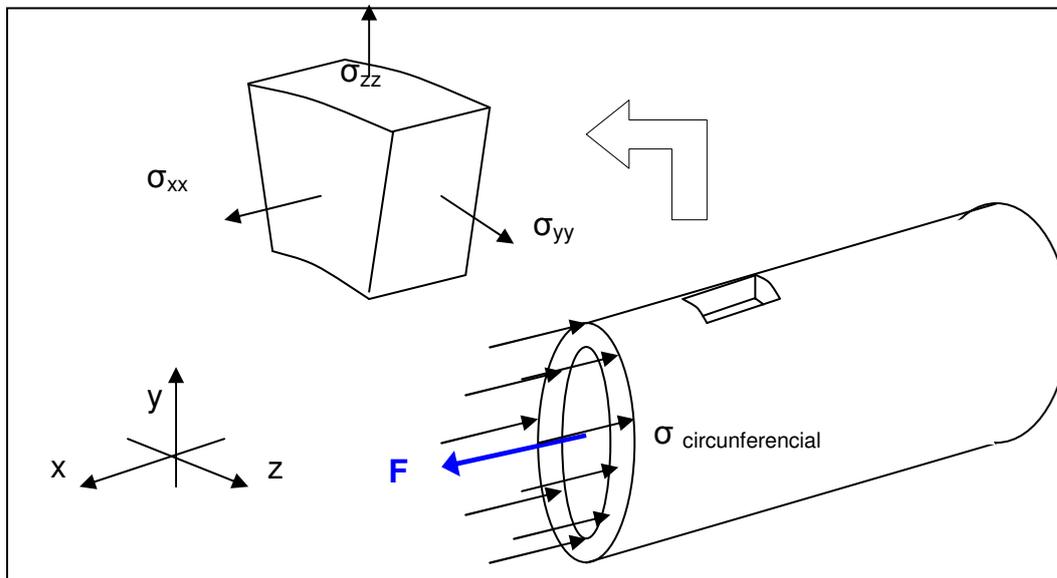


Figura 2.2 – Representação do estado triaxial em um elemento de duto

O corpo livre em destaque na figura 2.2 consiste não apenas da parte do tubo, mas também do fluido contido dentro dos limites do corte. Para continuidade do estudo de tensões no caso pretendido, foi colocada nesse modelo uma luva externa, concêntrica ao duto, com um anular de argamassa entre o duto e a luva, conforme representado na figura 2.3 a seguir. Para adequação a esse trabalho será analisada a tensão longitudinal σ_{xx} no duto.

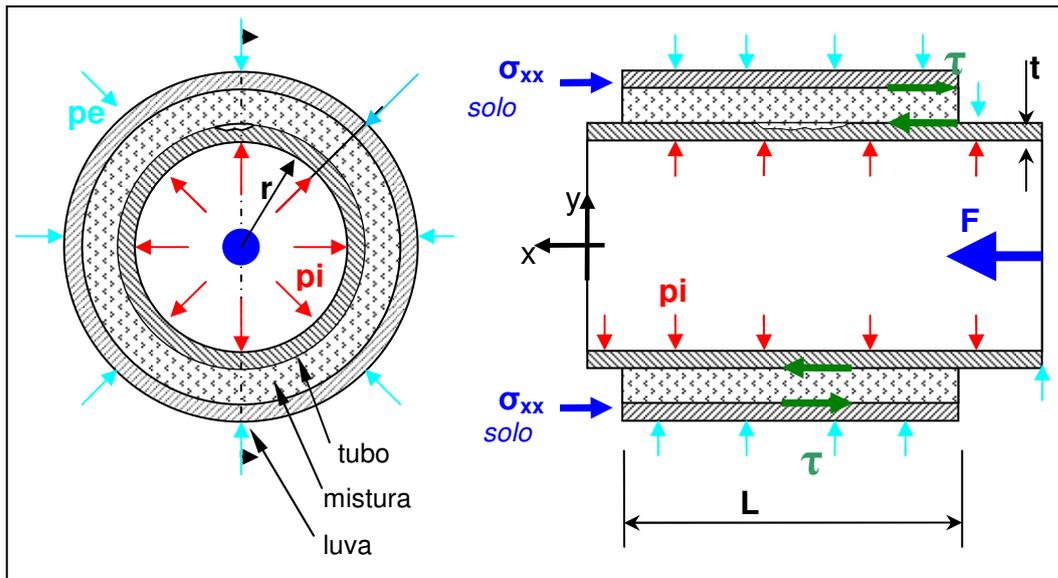


Figura 2.3 – Representação de uma seção de um duto de raio interno r e espessura de parede t , completamente enterrada, submetida a uma força de carregamento F que gera pressões internas p_i .

Uma vez que o raio hidráulico é totalmente preenchido ocupando toda a circunferência interna do duto, o carregamento radial provoca pressões sobre a parede interna do mesmo (P_i). A força resultante F da pressão interna é uma força igual a $P_i \cdot \pi \cdot r^2$, onde r é o raio interno do duto e P_i a pressão interna gerada.

A tensão longitudinal σ_{xx} é obtida a partir do equilíbrio de um corpo livre do cilindro, que inclui não apenas a parte do tubo, mas também seu conteúdo. A resultante das tensões longitudinais é igual a $\sigma_{xx} (2 \pi r t)$, onde t é a espessura da parede do duto. Dessa forma, a equação de equilíbrio para o corpo livre é :

$$\sigma_{xx} = (2 \cdot \pi \cdot r \cdot t) - p_i \cdot \pi \cdot r^2 = 0 \quad (2.5)$$

Resolvendo-se essa equação para σ_{xx} , se obtém a fórmula a seguir para a tensão longitudinal no duto:

$$\sigma_{xx} = p_i \cdot \frac{r}{2t} \quad (2.6)$$

Durante a passagem dos esforços do duto para a luva surgem tensões cisalhantes τ entre as paredes da luva e do duto e a argamassa.

$$\tau = \frac{F}{(\pi \cdot 2r \cdot L)} \quad (2.7)$$

Conforme mostrado na figura 2.3, a tensão longitudinal gerada pela força F é passada para a luva através do anular de argamassa que, no caso da seção completamente enterrada, o solo ancora a luva e daí surge à tensão reagente longitudinal σ_{xx} , contrapondo ao movimento de expansão do duto.

2.3. Correlação de Tensões entre Dutos e Conexão de Reparo

O estudo desse tipo de conexão tem sido feito desde a década de 1970. Alguns artigos sobre o assunto (Yamasaki, 1980; Tebbett e Billington, 1985 e 1988; Lamport, 1987) indicam que a resistência deste tipo de conexão, geralmente, é quantificada em termos da resistência de aderência equivalente, definida como a carga transmitida através da interface aço/mistura, dividida pela área da interface.

Os estudos desenvolvidos por Yamasaki, et. al., em 1980, descreveram o comportamento de uma série de ensaios dinâmicos e estáticos para conexões *pipe-in-pipe* com espaço anular preenchido com cimento. O objetivo desses ensaios foi à investigação da resistência das juntas usadas para conexão de membros estruturais de pernas de plataformas fixas marítimas com tubos de aço usados como estacas para fixação da plataforma.

Dentre os tipos de ensaios estáticos conduzidos por Yamasaki destaca-se o de expulsão, aplicado em um pequeno modelo, a fim de investigar o efeito provocado, de acordo com as condições da superfície de um duto e do trecho de seu comprimento colado, sobre a resistência ao cisalhamento.

Cada modelo para ensaio foi uma conexão *pipe-in-pipe*, como mostrado na Figura 2.4 (a). Dois tubos de aço de diâmetros diferentes, um por dentro do outro, e no espaço anular entre eles foi colocada argamassa de cimento. Dois tipos de argamassa de cimento foram testados. Na primeira foi utilizado apenas um cimento Portland. A segunda foi uma mistura de cimento e aditivo que para prover uma alta resistência à compressão com pouco tempo de cura.

Os modelos foram submetidos ao carregamento compressivo aplicado no topo do tubo interno. O escorregamento relativo entre o tubo interno e o externo foi medido por um relógio comparador (*dial gauge*) como mostrado na Figura 2.4 (a). Os esforços sobre a parede do tubo de aço foram medidos por *strain gauges*

para examinar as distribuições de tensões na parede do tubo e a pressão de expansão devido à expansão da argamassa no espaço anular.

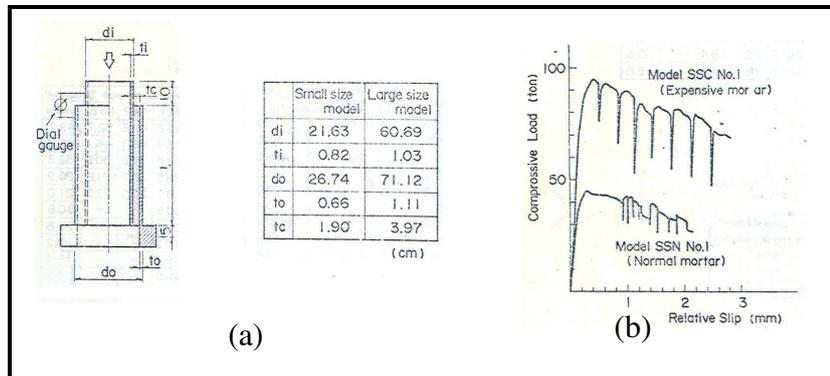


Figura 2.4 – Esquemática do modelo testado e diagrama comparativo das argamassas (Yamasaki,1980)

No ensaio foi levantado o comportamento dos modelos com diferentes tipos de argamassas submetidos aos carregamentos de compressão até a falha é mostrado na Figura 2.4(b) em termos da relação entre o carregamento e do escorregamento.

O teste mostrou que a resistência ao cisalhamento é afetada pelas condições da superfície do tubo de aço. Isso implica que um tubo de aço com a superfície corroída pode prover um aumento no valor de carregamento máximo na conexão.

A análise dos resultados dos ensaios estáticos cada trecho do comprimento aderido influencia a resistência ao cisalhamento. O mecanismo de propagação de tensões de uma conexão *pipe-in-pipe* pode ser considerada como o correspondente modelo ilustrado na Figura 2.5.

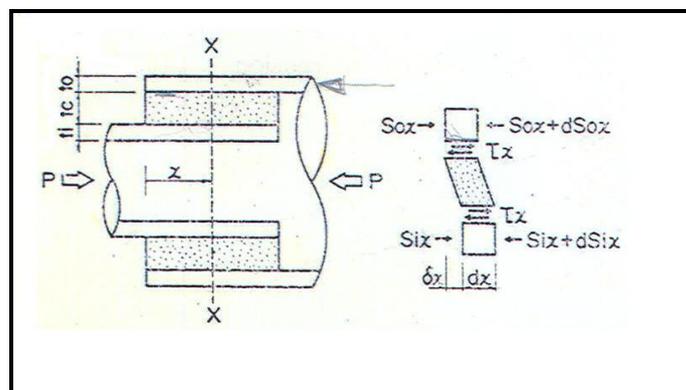


Figura 2.5 – Modelo assumido para as análises de distribuição de tensões (Yamasaki,1980)

Considerando o equilíbrio do pequeno elemento entre as seções x e $x + dx$, a tensão cisalhante pode ser expressa como:

$$\tau_x = \frac{dS_{ox}}{dx} = - \frac{dS_{ix}}{dx} \quad (2.8)$$

A equação do deslocamento relativo entre o tubo interno e o externo para x é dada como:

$$\frac{d\delta x}{dx} = \frac{S_{ox}}{E t_o} - \frac{S_{ix}}{E t_i} \quad (2.9)$$

Onde:

S_o – Força normal por unidade de comprimento do tubo externo

S_i – Força normal por unidade de comprimento do tubo interno

δ – Deslocamento

E – Módulo de elasticidade do aço

t_o – Espessura do tubo externo

t_i – Espessura do tubo interno

O resultado obtido em todos os ensaios foi que os modelos falharam por escorregamento ao longo da interface entre o tubo interno e a argamassa de cimento.

O trabalho de Yamasaki concluiu que a média das tensões de cisalhamento-aderência decresce como o crescimento do comprimento do tubo aderido. Portanto, o carregamento máximo da conexão não tem uma relação proporcional com o comprimento colado. Essas situações acontecem, pois a tensão de cisalhamento na interface entre a argamassa e o tubo de aço atinge o máximo nas extremidades da conexão e porque a diferença entre essas tensões nas extremidades da conexão e a mínima tensão na longitudinal do centro da conexão cresce como o comprimento colado.

A resistência cisalhamento-aderência pode ser expressa como a soma da resistência natural de aderência da interface e a resistência de atrito causada pela expansão da argamassa.

Posteriormente, em 1987, W.B.Lamport, et.al., também publicou um trabalho onde realizou uma série de ensaios em 18 conexões de estacas e luvas

com anular de cimento para examinar a influencia de carregamentos combinados (momento e compressão axial), localização relativa de *shear keys* entre a luva e a estaca, excentricidade entre a luva e a estaca e a resistência da argamassa.

Os resultados desses ensaios levaram a conclusão de que o carregamento do momento não teve um efeito prejudicial na capacidade axial da conexão; a posição relativa dos *shear keys* na estaca e na luva não afetou a capacidade da conexão. Um ensaio em uma réplica da conexão mostrou uma capacidade menor a do ensaio de resistência cúbica; que a capacidade da conexão não foi afetada pela variação da espessura do anular de cimento e que a capacidade da conexão aparenta ser uma função não linear da resistência compressiva da pasta de cimento não confinada.

Na década de 1980, I.E. Tebbett publicou um relatório onde traçou uma série de vantagens na aplicação da conexão para reparo de estruturas submarinas da época e a necessidade de se realizar reparos uma vez que os equipamentos permaneceriam por longo tempo em seus locais de assentamento. Mostra também as vantagens do uso da resina epóxi como componente da argamassa de cimento provendo-a de características que melhoram a aderência dessa argamassa na parede da estrutura metálica.

2.4. Estudo do comportamento de juntas sobrepostas simples

2.4.1. Mecanismo de adesão

Para melhor descrição do mecanismo foi usado como modelo uma barra de aço envolta em concreto. Pode-se definir aderência como sendo o mecanismo de transferência de tensões através da interface entre o aço e o concreto. A forma usual de consideração dessa ligação tem sido por meio da definição de uma “tensão de aderência”, e sua distribuição ao longo da interface tem sido investigada, já que seu conhecimento é essencial para a compreensão do comportamento de ancoragens retas, de ganchos e de emendas.

A aderência está associada a uma combinação das parcelas relativas à adesão, ao atrito e à ancoragem mecânica. Esta divisão, entretanto, é meramente didática, não sendo possível se determinar cada componente isoladamente, devido à complexidade dos fenômenos envolvidos.

A adesão ou aderência química surge devido às ligações físico-químicas na interface durante as reações de pega do concreto. Essa parcela, caracterizada por uma resistência de adesão R_{b1} como indicada na figura 2.6, pode ser constatada através da separação de um bloco concretado sobre uma chapa metálica. Neste caso, verifica-se somente a existência da ligação por adesão. Geralmente, considera-se que a adesão seja perdida pelas ações de serviço, ou retração do concreto e que as tensões de aderência próximas da ruptura sejam mobilizadas principalmente pela engrenagem mecânica das nervuras.

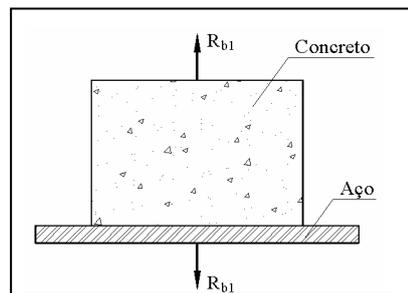


Figura 2.6 – Aderência por adesão (Fernandes & Debs 2005)

A parcela relativa ao atrito é decorrente da ação das forças de atrito existentes entre os dois materiais quando uma barra é tracionada pela carga R_{b2} conforme mostrado na figura 2.7. Estas forças dependem do coeficiente de atrito de contato entre o aço e o concreto, o qual é função da rugosidade superficial da barra. A aderência por atrito, se manifesta devido à pressão transversal do concreto sobre a armadura como, por exemplo, a de retração ou de confinamento.

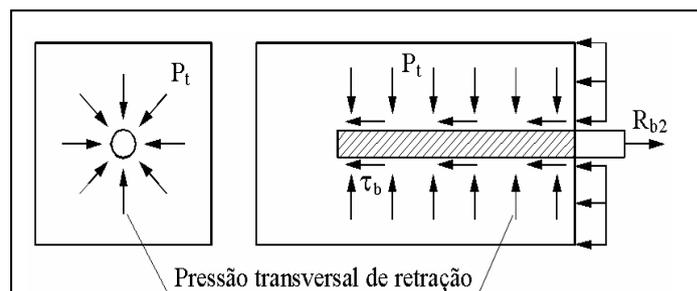


Figura 2.7 – Aderência por atrito (Fernandes & Debs 2005)

A componente R_{b3} relativa à aderência mecânica na figura 2.8 está associada às forças concentradas de compressão que surgem perpendiculares às faces das nervuras no momento em que a barra é tracionada e tende a deslizar. Estas forças provocam a micro-fissuração e o micro-esmagamento do concreto na

região das nervuras. Mesmo em barras lisas, existe o efeito da aderência mecânica, devido às irregularidades superficiais decorrentes do processo de laminação.

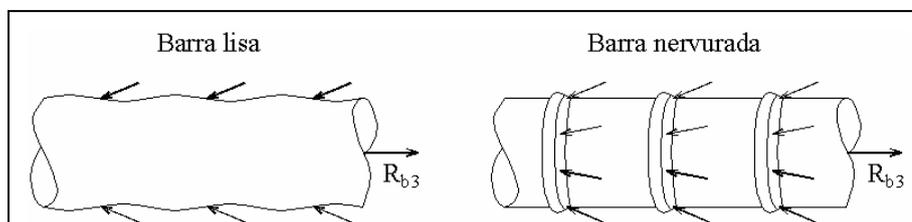


Figura 2.8 – Aderência mecânica (Fernandes & Debs 2005)

A eficiência dessa ligação pode ser quantificada através da relação tensão de aderência *versus* deslizamento, a qual representa a variação da tensão que surge na interface do aço com o concreto, relacionada ao deslocamento relativo entre a barra da armadura e o concreto envolvente.

O comportamento da aderência é fortemente afetado pelas forças às quais a peça está submetida.

Existem dois tipos de rupturas da aderência para corpos-de-prova sob carregamento: ruptura por arrancamento direto da barra e fendilhamento do cobrimento do concreto, ilustrados na figura 2.9 (Fernandes & Debs, 2005).

A primeira ocorre quando existe um confinamento suficiente da armadura, permitindo o corte do concreto entre as nervuras. Esse modo de ruptura está relacionado principalmente à resistência do concreto e ao tipo e à geometria das nervuras.

O fendilhamento do cobrimento pode ser definido como o efeito da tração circunferencial ocasionado pelas componentes radiais das tensões de compressão que transferem o esforço do aço para o concreto. Esse tipo de ruptura ocorre quando o confinamento é insuficiente para garantir o arrancamento completo da barra. As tensões radiais de tração, oriundas das tensões diagonais de compressão, ocasionam uma pressão no concreto em torno da barra tornando essa região microfissurada e sujeita ao fendilhamento paralelo ao eixo da armadura.

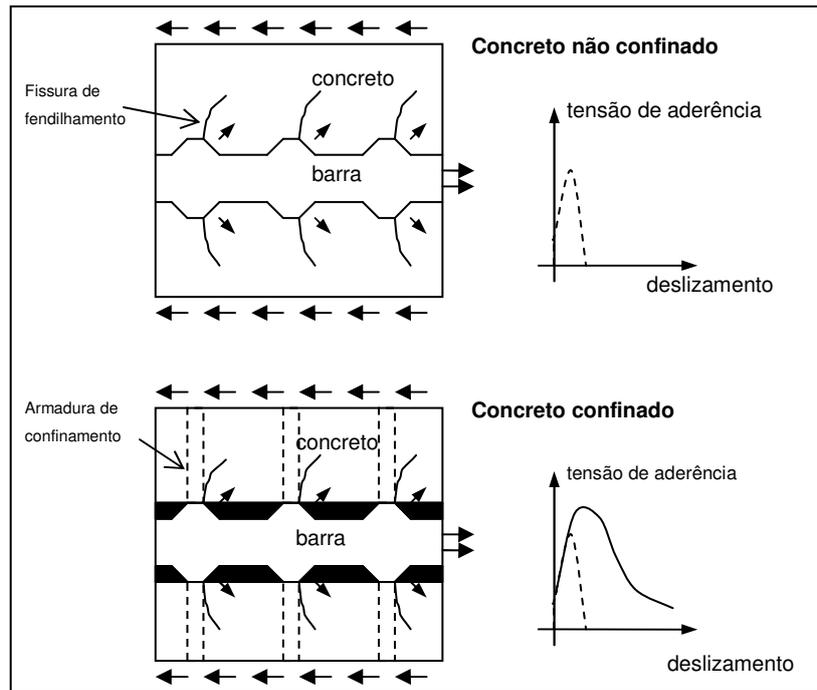


Figura 2.9 – Ruptura por aderência por fissuração por fendilhamento em concreto não-confinado e arrancamento em concreto confinado (Fernandes & Debs 2005)

2.4.2. Análise de tensões em juntas sobrepostas

Juntas sobrepostas têm sido estudadas detalhadamente e são as mais comumente usadas. Algumas formas práticas de juntas sobrepostas estão mostradas na Figura 2.10, a seguir. Cada uma apresenta vantagens e desvantagens em termos da facilidade de fabricação e/ou homogeneidade na distribuição de tensões. O caso analisado foi a Sobreposta Simples, Figura 2.11 (d).

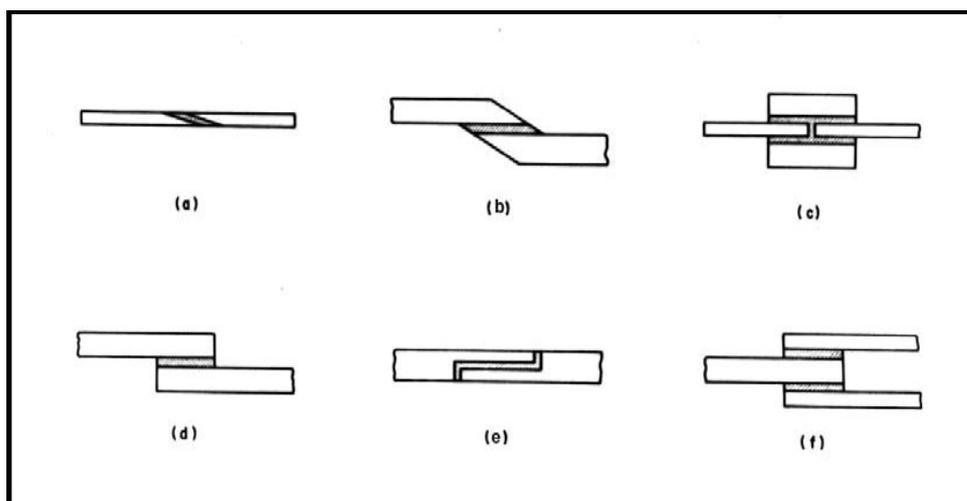


Figura 2.10 – Tipos representativos de juntas sobrepostas unidas por adesão (Shield 1974)

Submeter uma junta sobreposta simples a um carregamento trativo ou compressivo produz uma distribuição não uniforme de tensões conforme é mostrado na Figura 2.11:

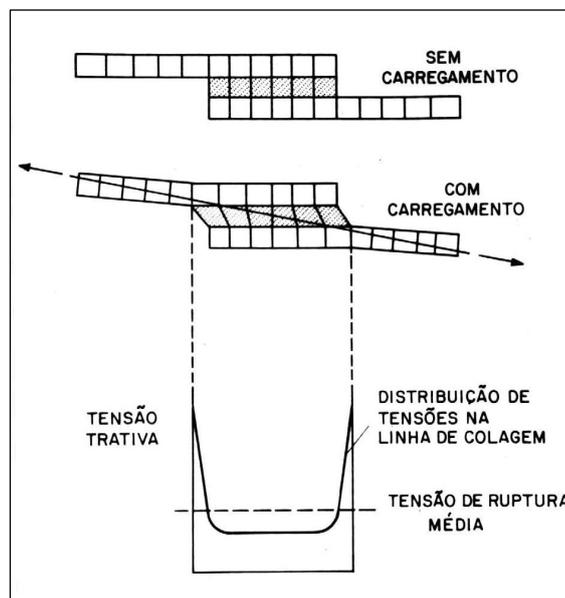


Figura 2.11 – Distribuição de tensões de cisalhamento na linha de colagem em uma junta sobreposta sob carregamento trativo (Shield 1974)

Na figura 2.11 é mostrado que os picos de tensão ocorrem nos dois extremos da superposição. Estas concentrações de tensão são causadas pela proximidade da extremidade das superfícies metálicas sobrepostas e pela deflexão dessas superfícies sob a carga a qual a estrutura está submetida. Estes picos de tensão são menores para elastômeros, mas aumentam com a redução da flexibilidade do adesivo.

A espessura do adesivo é outro fator que determina a resistências ao cisalhamento de juntas sobrepostas. Geralmente as maiores resistências são obtidas com camadas mais finas de adesivo.

2.4.3. Comportamento mecânico das juntas sobrepostas

Junta sobreposta simples que consiste de duas placas que formam um sobreposto e são unidas por uma camada de adesivo entre elas. O carregamento no plano das placas produz tensões cisalhantes e tensões normais no adesivo, assim como as faces coladas das placas. A junta pode falhar tanto no adesivo quanto na interface, de acordo com as tensões desenvolvidas em cada uma destas partes e,

também, de acordo com a resistência do adesivo. A adesão interfacial dos adesivos modernos é alta e a falha frequentemente ocorre no adesivo nos casos de juntas metal-metal. (Berry, 2004)

A tensão de cisalhamento, definida como a carga dividida pela área real de colagem, que ocorre no plano paralelo à aplicação do carregamento, desenvolvida neste tipo de junta não é uniforme. A tensão de cisalhamento máxima pode ser maior do que a tensão de cisalhamento média conforme mostrado na figura 2.11. A razão entre a tensão de cisalhamento máxima e a média, ou aparente, é denominada fator de concentração de tensão. Este parâmetro é dependente de parâmetros geométricos da junta e das constantes elásticas dos materiais que constituem a junta. (Berry, 2004)

A existência de uma deformação não uniforme nas juntas sobrepostas pode ser compreendida pela comparação entre uma junta formada por substratos inextensíveis e outra com extensíveis, ou seja, membros rígidos, porém que não sofrem deflexão. (Berry, 2004).

Ao se carregar a junta, os substratos inextensíveis irão se deslocar como blocos sólidos, assim o adesivo irá sofrer uma deformação cisalhante, deformando-se de forma a acomodar o deslocamento dos substratos que será o mesmo em toda a junta, como mostrado na figura 2.12 (b). Porém, cada substrato suporta toda a carga aplicada **P** até imediatamente antes do sobreposto e a transmite gradualmente através do adesivo. Então, a tensão do membro **I** será maior no ponto **A** e diminuirá gradualmente em direção ao ponto **B**, onde será nula. Contrariamente, a tensão do aderente **II** será maior em **B** e diminuirá até chegar a zero, em **A**.

A variação da tensão cisalhante não é importante se os substratos **I** e **II** se comportarem como sólidos inextensíveis, mas se eles forem extensíveis e obedecerem às Leis da Elasticidade, os mesmos desenvolverão deformações proporcionais às tensões existentes. A distribuição de deformações será como na figura 2.12 (c), onde os pontos correspondentes originais, **B**, **B'**, perto da junta e, **C**, **C'**, nas extremidades do sobreposto estarão deslocados de valores diferentes, **e1** e **e2**, respectivamente. Observou-se que o deslocamento da extremidade do sobreposto, **e2**, é consideravelmente maior, o que resulta em uma tensão cisalhante maior no adesivo em cada extremidade do sobreposto. Pesquisas (Kinloch, 1994; Alves, 1995 e 1998; Lamport, 1987; Berry, 2004) têm

confirmado por testes as observações acima, os quais mostram que a fratura de uma junta deste tipo começa, preferencialmente, na borda da junta.

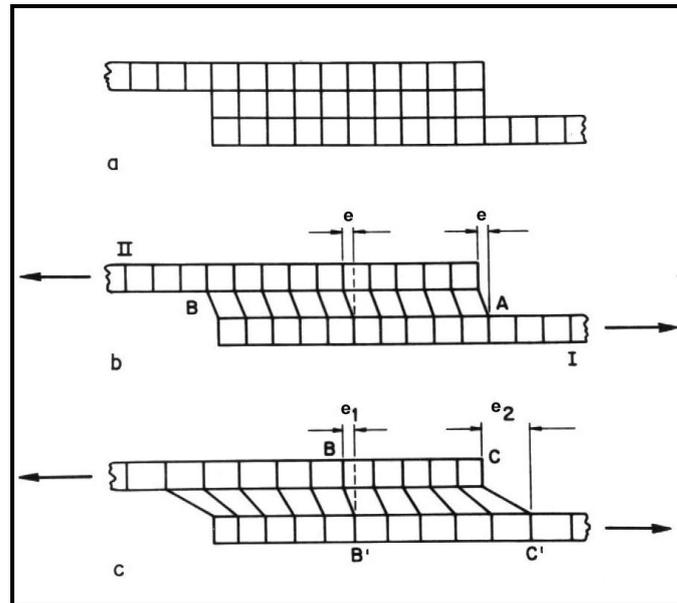


Figura 2.12 – Representação esquemática do cisalhamento no adesivo em junta tipo sobreposta simples. (a) junta sobreposta antes do carregamento, (b) junta sob reposta com substratos inextensíveis e (c) junta sobreposta com substratos extensíveis. (Kinloch, 1994)

Outro ponto a considerar é a excentricidade da carga uma vez que os substratos de uma junta sobreposta estão axialmente deslocados entre si, pelo menos, de sua espessura, Figura 2.13(a). A linha de carregamento que une os pontos de aplicação das cargas P será oblíqua e passará pelo ponto médio da junta. Imediatamente antes do início do sobreposto, a linha de carregamento estará ao longo das faces internas de cada membro, figura 2.13(b), desde que o comprimento de cada membro fora do sobreposto seja consideravelmente maior do que o próprio sobreposto. Para esse modelo foi considerado que a espessura do adesivo é muito menor que a espessura do substrato ($s_{\text{adesivo}} \ll s_{\text{substrato}}$) e que o comprimento do adesivo é muito menor que o comprimento do substrato ($L_{\text{adesivo}} \ll L_{\text{substrato}}$).

A excentricidade da carga aderente causará um momento fletor, $M = 0,5.P.s$, onde P é a carga aplicada e s a espessura do substrato, Figura 2.13(c). Sob a ação desse momento fletor, os substratos, caso sejam suficientemente longos, fletem e a junta fica deformada, como na Figura 2.13(d). Esta deformação reduz as tensões normais, pois a linha de carregamento estará mais próxima do eixo central de cada

membro e, portanto, o momento fletor será reduzido. A junta tende a se deformar para uma posição com quantidade mínima de energia de deformação.

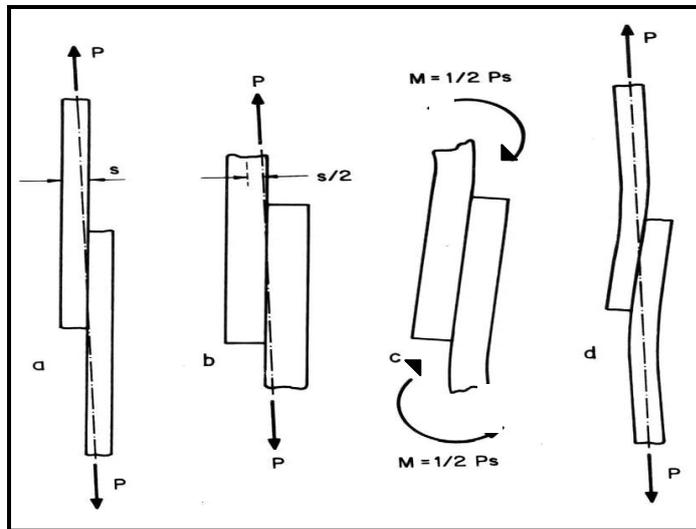


Figura 2.13 – Representação esquemática das flexões dos substratos e das tensões normais resultantes nas extremidades do sobreposto. (De Bruyne, 1951)

A existência desta excentricidade de carga gera tensões normais à superfície da junta. Estas tensões estão confinadas nas regiões adjacentes às extremidades do sobreposto e podem influenciar consideravelmente a resistência dessa junta.

2.4.4. Modos de falhas em juntas unidas por adesão

Podem ocorrer dois tipos de fratura em juntas unidas por adesão: fratura decoesiva (também denominada adesiva) ou fratura coesiva, conforme ilustrado na Figura 2.14.

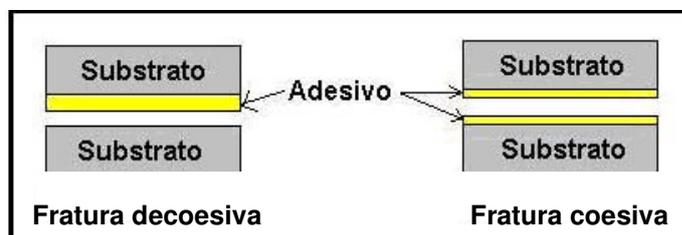


Figura 2.14 – Tipos de fratura em juntas coladas (Barcia, 2003)

A fratura decoesiva ocorre na interface entre o adesivo e o substrato. Já a fratura coesiva ocorre no interior do adesivo, permanecendo ambos os substratos com uma camada superficial de adesivo. Uma vez obtida uma boa adesão, sem defeitos na região colada, presume-se que apenas a fratura coesiva possa ocorrer,

pois as tensões atuantes na ligação entre o adesivo e o substrato excedem as tensões de ruptura experimentais (Elay, 1964). Entretanto, para as aplicações pretendidas de campo é muito difícil a obtenção de boa adesão.

Ressalta-se também que aspectos geométricos do projeto da junta e o processo de colagem podem ser responsáveis pelo tipo de fratura em juntas coladas. Juntas que apresentam pequenas variações em sua geometria, em relação ao projeto de espessura ideal de adesivo ou dimensionamento equivocado de ancoragem, poderão apresentar fratura do tipo coesiva, como será visto adiante.

Condições inadequadas de utilização, como processos impróprios de preparação da superfície do substrato, mudanças nas propriedades dos adesivos (devido à degradação ou à cura incompleta) e/ou processos de colagem deficientes promovem fratura decoesiva.

A falha de uma junta unida por adesão pode apresentar ambos os tipos de fratura. Constatou-se que duas juntas unidas por adesão que inicialmente apresentavam fratura coesiva, passaram a apresentar fratura decoesiva após a exposição contínua à água. Essa constatação induz novamente a supor que para aplicações de campo, submarina ou solos encharcados, a tendência de falha será decoesiva.