

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Izabel Cortes Carazzo

**ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE LIGAÇÕES SOLDADAS
EM BARRAS DE AÇO DE CONCRETO ARMADO.**

Santa Cruz do Sul
2015

Izabel Cortes Carazzo

**ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE LIGAÇÕES SOLDADAS
EM BARRAS DE AÇO DE CONCRETO ARMADO.**

Trabalho de conclusão apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade de Santa Cruz do Sul - UNISC, para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. M. Sc. Christian Donin

Santa Cruz do Sul
2015

AGRADECIMENTOS

Agradeço a pessoa que teve toda a paciência comigo, quando eu estava impaciente, que me compreendeu e apoiou quando estive ausente, enfim, que me ajudou a superar todos os desafios para eu conseguir chegar até aqui, John, muito obrigada por tudo, sem você eu não chegaria na metade do caminho, mas juntos conseguiremos ir cada vez mais longe.

Agradeço aos meus pequenos, que passaram as madrugadas comigo, me dando carinho e me ajudando a ficar acordada para terminar o trabalho, mesmo sem falar nada eles sempre me transmitiram muita paz e paciência nas horas difíceis, obrigada meus amores Pérola e Preto.

Agradeço ao meu orientador , Professor Christian Donin, pelos ensinamentos passados, pelo tempo que dedicou para sanar minhas dúvidas, por ser prestativo, paciente e por sempre ter me incentivado. Muito obrigada professor, toda sua dedicação colaborou para a conclusão deste trabalho.

"Esta parte da minha vida,
esta pequena parte,
chama-se felicidade."

(The Pursuit of
Happyness ,2006)

RESUMO

O aço é uma das partes fundamentais na execução de obras, pois ele suporta os esforços de tração aplicados nas peças. Porém, os aços fabricados para construção possuem um limite de comprimento para comercialização, desta forma, na execução dos projetos de engenharia é indispensável a emenda de barras de aço. Desta forma, para a diminuição de tempo de execução, ajustes em esperas de aço e reparos com difícil acesso, a emenda com solda mostra-se a melhor opção entre as outras citadas nas normas vigentes. Neste trabalho são analisadas o cálculo e a execução das emendas soldadas por traspasse, segundo as normas vigentes e bibliografia técnica reconhecida, comparando os resultados teóricos com os experimentais, para poder estabelecer qual a melhor variação da emenda com solda pode ser usada para simplificar os problemas encontrados na obra. No presente estudo, são testadas barras de diferentes diâmetros, primeiramente sem emenda, que serão submetidas ao ensaio de tração, e posteriormente, amostras destas mesmas barras serão emendadas com solda por traspasse conforme proposto pela NBR 6118:2014, e serão feitas outras amostras com diferentes variações de comprimento no filete de solda. Após a realização dos ensaios de tração nas amostras, os resultados são analisados teoricamente, e comparados com o ensaio da barra sem emenda, além de comparados aos resultados teóricos fundamentados nos modelos de cálculo da mecânica dos materiais. Ao final do estudo são apresentadas conclusões sobre as características das emendas soldadas para os diferentes comprimentos de solda testados e são definidas quais variações de comprimento são possíveis para serem aplicadas em estruturas de concreto armado, sem prejudicar as características dos materiais e garantindo que seja alcançada a resistência necessária de acordo com a capacidade de carga da barra de aço emendada e assim, estabelecer um procedimento mais simplificado possível que facilite a resolução de problemas nas obras com mais agilidade e economia.

Palavras-chave: emendas de barras; emendas com solda; barras de aço.

ABSTRACT

The steel is one of the main parts in the execution of works, because it supports the traction efforts applied on the pieces. However, the manufactured steels for construction have a limit of length for marketing; so, in the execution of engineering projects is essential the seam of steel bars. In this way, to decrease the execution period, in case of adjustments in steel structures and repairs with difficult access, the welded seam seems to be the best option among the others quoted in the current norms. In this work, were analyzed the calculation and the execution of welded seams by crossover, according to the current norms and well-known technical biography, comparing the theoretical results with the experimental, for establishing which is the best variation of welded seam that can be used to simplify the problems that were found in the construction work. In the present study, it was tested stick-shaped of different diameters, at first without seam, which were submitted for a traction trial, and after, samples of the same stick-shaped were amended with weld by crossover, as proposed by NBR 6118:2014 , and it was done another samples with different varieties of length in the welding thread. After the realization of the traction trial in the samples, the results were analyzed and compared with the stick-shaped trial without seam, besides compared on theoretical results funded of calculation model of mechanics of materials. At the end of the study, it was presented conclusions about the characteristics of the welded seams for the different length of weld tested and it was defined which varieties of length are possible to be applied in reinforced concrete structures, without damage the characteristics of the materials and ensuring that the enough resistance be reached according to the capacity of the steel bar's load amended and in this way, establish a more simplified possible procedure that ease up the problems resolution in construction works with more agility and economy.

Key words: seam of steel bars; seam with weld; steel stick-shaped.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 - Emenda por traspasse.	18
Figura 02 - Exemplo de luva rosqueada.....	19
Figura 03 - Solda de topo por caldeamento.	20
Figura 04 - Solda de topo com eletrodo.	21
Figura 05 - Solda por traspasse.	22
Figura 06 - Emenda com solda com barras justapostas.	22
Figura 07 - Solda com cobrejuntas.....	23
Figura 08 - Compatibilidade solda com o metal base.	24
Figura 09 - Processo soldagem SMAW	25
Figura 10 - Soldagem com processo SAW.....	26
Figura 11 - Processo GMAW.	26
Figura 12 - Processo de soldagem por FCAW.	26
Figura 13 - Solda de entalhe com penetração total.....	30
Figura 14 - Solda de tampão.....	31
Figura 15 - Solda de filete.	32
Figura 16 - Esquema de solda em filete.....	32
Figura 17 - Execução solda de filete.	34
Figura 18 - Filetes longitudinais.....	34
Figura 19 - Cálculo da área do filete.	35
Figura 20 - Esforços atuantes na solda.....	36
Figura 21 - Emendas de filetes transversais.	37
Figura 22 -. Gráfico tensão x deformação do aço, não está em escala.	38
Figura 23 - Barra testemunho diâmetro 8mm com comprimento de solda de $\geq 5 \varnothing$. $\geq 5 \varnothing$. $\geq 5 \varnothing$	41
Figura 24 - Barra testemunho diâmetro 10mm com comprimento de solda de $\geq 5 \varnothing$. $\geq 5 \varnothing$. $\geq 5 \varnothing$	41
Figura 25 - Barra testemunho diâmetro 12,5mm com comprimento de solda de $\geq 5 \varnothing$. $\geq 5 \varnothing$. $\geq 5 \varnothing$	42
Figura 26 - Primeiro modelo de variação para barra diâmetro 8mm. $5 \varnothing$. \varnothing . $5 \varnothing$	42
Figura 27 - Primeiro modelo de variação para barra diâmetro 10mm - $5 \varnothing$. \varnothing . $5 \varnothing$	43
Figura 28 - Primeiro modelo de variação para barra diâmetro 12,5mm - $5 \varnothing$. \varnothing . $5 \varnothing$	43
Figura 29 - Segundo modelo proposto para barra diâmetro 8mm, comprimento do filete de $8 \varnothing$	44

Figura 30 - Segundo modelo proposto para barra diâmetro 10mm, comprimento do filete de 8ϕ	44
Figura 31-Segundo modelo proposto para barra diâmetro 12,5mm, comprimento do filete de 8ϕ	45
Figura 32 - Terceiro modelo proposto para barra diâmetro 8mm, comprimento do filete de 7ϕ	45
Figura 33 - Terceiro modelo proposto para barra diâmetro 10mm, comprimento do filete de 7ϕ	46
Figura 34-Terceiro modelo proposto para barra diâmetro 12,5mm, comprimento do filete de 7ϕ	46
Figura 35 - Gráfico de tensão-deformação da barra diâmetro 8mm sem emenda....	47
Figura 36 - Gráfico de tensão-deformação para barra diâmetro 10mm sem emenda.	47
Figura 37 - Gráfico de tensão-deformação para barra diâmetro 12,5mm sem emenda.....	48
Figura 38 - Eletrodo utilizado nas emendas.....	48
Figura 39 - Área efetiva da solda.	50
Figura 40 - Máquina de solda para processo do arco elétrico com arco revestido....	51
Figura 41 - Barras diâmetro 8mm soldadas conforme a norma, e na sequência conforme primeiro modelo proposto.	52
Figura 42 - Barras diâmetro 10mm soldadas primeiro conforme a norma, e na sequência conforme primeiro modelo proposto.	52
Figura 43 - Barras diâmetro 12,5mm soldadas primeiro conforme a norma, e na sequência conforme primeiro modelo proposto.	52
Figura 44 - Barras diâmetro 8mm soldadas primeiro conforme modelo 02, e na sequência conforme modelo 03.....	53
Figura 45 - Barras diâmetro 10mm soldadas primeiro conforme modelo 02, e na sequência conforme modelo 03.....	53
Figura 46 - Barras diâmetro 12,5mm soldadas primeiro conforme modelo 02, e na sequência conforme modelo 03.....	53
Figura 47 - Realização de ensaio de tração em uma ligação soldada.	54
Figura 48 - Barras diâmetros 8, 10 e 12.5mm após ensaio de tração.....	55
Figura 49 - Emendas conforme a norma e conforme modelo 01 para barras diâmetro 8mm.....	56

Figura 50 - Emendas conforme a norma e conforme modelo 01 para barras diâmetro 10mm.....	56
Figura 51 - Emendas conforme a norma e conforme modelo 01 para barras diâmetro 12,5mm.....	56
Figura 52 - Barras diâmetro 8mm emendadas conforme modelo 02 e modelo 03...57	
Figura 53 - Barras diâmetro 10mm emendadas conforme modelo 02 e modelo 03.57	
Figura 54 - Barras diâmetro 12,5mm emendadas conforme modelo 02 e modelo 03.	57
Figura 55 - Gráfico tensão x deformação barra diâmetro 8mm conforme a norma. .60	
Figura 56 - Gráfico tensão x deformação barra diâmetro 8mm conforme o primeiro modelo.....	61
Figura 57 - Gráfico tensão x deformação barra diâmetro 8mm conforme o segundo modelo.....	61
Figura 58 - Gráfico tensão x deformação barra diâmetro 8mm conforme o terceiro modelo.....	61
Figura 59 - Variação dos resultados em relação à barra testemunho.	62
Figura 60 - Gráfico tensão x deformação barra diâmetro 10mm emendada conforme norma.....	64
Figura 61 - Gráfico tensão x deformação barra diâmetro 10mm conforme o primeiro modelo.....	64
Figura 62 - Gráfico tensão x deformação barra diâmetro 10mm conforme o segundo modelo.....	65
Figura 63 - Gráfico tensão x deformação barra diâmetro 10mm conforme o terceiro modelo.....	65
Figura 64 - Variação dos resultados em relação à barra testemunho.	66
Figura 65 - Gráfico tensão x deformação barra 12,5mm emenda conforme norma. 68	
Figura 66 - Gráfico tensão x deformação barra 12,5mm emenda conforme primeiro modelo.....	68
Figura 67 - Gráfico tensão x deformação barra 12,5mm emenda conforme segundo modelo.....	68
Figura 68 - Gráfico tensão x deformação barra 12,5mm emenda conforme terceiro modelo.....	69
Figura 69 - Variação dos resultados em relação à barra testemunho.	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Valores mínimos de resistência para aço CA.	17
Tabela 02 - Espessuras mínimas da garganta para solda em entalhe.	31
Tabela 03 - Tabela de espessuras mínimas da perna do filete.	33
Tabela 04 - Valores de tração do aço.	39
Tabela 05 - Resistência do eletrodo.	49
Tabela 06 - Resultados para Rd e força da barra.	50
Tabela 07 - Resultados do ensaio de tração barra diâmetro 8mm.	59
Tabela 08 - Resultados do ensaio de tração barra diâmetro 8mm.	60
Tabela 09 - Resultados do ensaio de tração da barra diâmetro 10mm.	63
Tabela 10 - Resultados do ensaio de tração da barra diâmetro 10mm.	63
Tabela 11 - Resultados do ensaio de tração da barra diâmetro 12,5mm.	67
Tabela 12 - Resultados do ensaio de tração da barra diâmetro 12,5mm.	67

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society Testing and Materials</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
C	Carbono
CA	Concreto Armado
CBCA	Centro Brasileiro da Construção em Aço
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
ISO	International Organization for Standardization
Mn	Manganês
MPa	Mega pascal
NBR	Norma Brasileira
UNE	<i>Una Norma Española</i>
ZTA	Zona Termicamente Afetada

LISTA DE SÍMBOLOS

ϕ	Diâmetro
t_e	Espessura efetiva
y	Profundidade entalhe
t	Comprimento da garganta de solda
ℓ	Comprimento do filete de solda
b	Comprimento perna do filete de solda
β	Fator de redução
L	Comprimento
A_w	Área da solda
R_d	Resistência de projeto
F	Força
τ	Tensão
f_w	Tensão resistente do metal da solda
γ_{w2}	Fator de segurança

SUMÁRIO

1 INTRODUCAO	14
1.1 Área e limitação do tema.....	14
1.2 Objetivo Geral	14
1.3 Objetivos específicos	15
1.4 Justificativa.....	15
2 REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 Introdução	16
2.2 Emendas de barras	17
2.2.2 Classificação das emendas.....	17
2.2.2.1 Emenda por traspasse	17
2.2.2.2 Emenda por luvas	18
2.2.2.3 Emendas de barras com solda.....	19
2.2.2.3.1 Solda de topo por caldeamento.....	20
2.2.2.3.2 Solda de topo com Eletrodo	20
2.2.2.3.3 Solda por traspasse.....	21
2.2.2.3.4 Solda com barras justapostas	22
2.2.2.3.5 Solda com cobrejuntas	22
2.3 Soldabilidade de aços estruturais.....	23
2.4 Principais processos de soldagem	25
2.5 Eletrodos	27
2.6 Ligações Soldadas	28
2.6.1 Tipos de ligações soldadas	29
2.6.1.1 Entalhe	29
2.6.1.2 Solda de tampão	31
2.6.1.3 Filete.....	31
2.7 Cálculo de resistência da solda.....	35
2.8 Distribuição dos esforços nas soldas.	37
2.9 Procedimentos conforme as normas.....	38
3 MATERIAIS E MÉTODOS DE PESQUISA.....	40
3.1 Métodos de pesquisa.	40
3.2 Definição dos modelos.	40
3.3 Materiais utilizados.....	46
3.3 .1 Aço	46

3.3.2 Eletrodo	48
3.4 Cálculos para determinação dos modelos propostos números 02 e 03.	49
3.5 Procedimentos realizados	51
3.5.1 Execução das emendas com solda.	51
3.5.2 Realização do ensaio de tração.	54
4 RESULTADOS E ANÁLISES	59
4.1.1 Resultados para barra diâmetro 8 mm.	59
4.1.2 Resultados para barra diâmetro 10 mm.	62
4.1.3 Resultados para barra 12,5 mm.	66
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	70
5.1 Conclusões.....	70
5.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	71
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

1 INTRODUCAO

Atualmente a busca por racionalização e agilidade na execução de obras tornou-se algo constante. Visando a diminuição de prazos e de perda de materiais, as técnicas disponíveis de execução precisam ser aperfeiçoadas.

Com isso, as emendas com solda apresentam diversas vantagens em relação aos outros tipos de emendas, pois podem ser executadas em lugares de difícil acesso, custo mais baixo e mão de obra que pode ser encontrada facilmente.

Desde as últimas décadas, o mercado vem aprimorando o aço soldável, o que facilita a técnica da emenda, diminuindo a possibilidade de mudar as características mecânicas do material a ser soldado. Com base nisso, a emenda com solda torna-se um método mais atrativo.

Porém, fixar um procedimento correto tem se mostrado difícil, devido a diversas informações que constam em inúmeras normas vigentes. Estudos nesta área ainda são poucos, tendo-se pouco material disponível para pesquisa.

Assim, é importante o estudo e ensaios deste tipo de emendas, pois seu método na construção civil é bastante utilizado, e apresenta possibilidades de melhorias e sua técnica para trazer maiores benefícios para a construção civil.

1.1 Área e limitação do tema

O trabalho foi desenvolvido na área de estruturas, baseando-se nos conhecimentos obtidos das disciplinas de mecânica geral, resistência dos materiais, mecânica estrutural e estruturas de concreto armado.

Com base nas NBR 6118:2014, NBR 14931:2004, NBR 8800:2008 e na norma americana AWS D1.1 (*American Welding Society*), as emendas com solda por traspasse serão analisadas teórica e experimentalmente afim de buscar melhores resultados para que a técnica seja simplificada.

1.2 Objetivo Geral

Este trabalho visa estabelecer uma verificação, com base nas normas vigentes e bibliografia técnica reconhecida, através de análises teóricas e

experimentais das variações da emenda com solda em barras de aço para concreto armado.

1.3 Objetivos específicos

Objetivos específicos:

- Analisar os métodos de cálculos das emendas com solda, comparando os resultados teóricos com os experimentais.
- Verificar através de ensaio de tração e cálculos quais as variações possíveis de comprimento na execução da solda que permitam facilitar o processo de execução da solda durante a obra.
- Propor um novo modelo de emenda por solda com traspasse com comprimentos de filete menores do que a norma recomenda.

1.4 Justificativa

O estudo dos procedimentos de emenda de barras de aço por meio de solda, é de suma importância para a elaboração do projeto da estrutura de concreto armado. O aço é responsável por absorver os esforços de tração da estrutura, e é indispensável nas construções.

A norma é extremamente específica nas suas recomendações, não deixando muitas opções para que em situações especiais o método de emenda por solda seja empregado.

Deste modo, é necessário verificar através de ensaios quais variações são possíveis para simplificar o processo em obra. Comparando os resultados obtidos com os limites pré-estabelecidos por norma, torna-se mais simples a adoção de melhores métodos e conseqüentemente a simplificação nas soluções de problemas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Introdução

Segundo Leonhardt e Mönning (1977), os esforços de tração nas peças estruturais solicitadas à flexão e à tração devem ser absorvidos pela armadura de aço. O concreto e o aço possuem particularidades em seus materiais, que fazem os dois se unirem e conseguirem uma aderência entre eles. Basicamente, conforme Fusco (2005), esta aderência se dá devido ao valor influenciado pela retração, fluência e fissuração do concreto.

Há vários tipos de aços, aços fundidos, aços inoxidáveis, aços estruturais, entre outros. Chiaverini (1996), classifica os aços estruturais, ou aços CA, como aços carbono de dureza natural laminados a quente. Para este tipo de classificação, os requisitos que esses aço devem obedecer são os seguintes: ductibilidade e homogeneidade, valor elevado da relação de resistência e limite de escoamento, resistência média à corrosão e soldabilidade.

Os aços CA possuem boa soldabilidade pois a sua composição química é formada, segundo Chiaverini (1996), por teor de carbono que varia de 0,15% a 0,40% e manganês em torno de 0,80%. Com estas características o aço em contato com a solda não altera sua resistência, e cuidados especiais na execução da solda não são necessários.

Hoje, o aço mais usado na construção civil é o CA, aço para concreto armado, disponível em diâmetros que variam de 5 a 40mm, e com comprimento de 12m. Ele possui nervuras que aumentam a aderência com o concreto e facilitam a transmissão de esforços entre barras via concreto. Conforme Leonhardt e Mönning (1977), sempre que possível, o comprimento original da barra deve ser aproveitado, evitando emendá-la, sendo que as emendas devem ser executadas de modo a formar "gaiolas" ou "esqueletos" rígidos indeslocáveis, ou seja, tornar a armadura um elemento monolítico e servir para dar continuidade na transmissão dos esforços.

No Brasil, os tipos de emendas estão descritas nas NBR 6118:2014 e NBR 14931:2004, sendo a mais utilizada a emenda por traspasse. Leonhardt e Mönning (1977), descrevem que nas emendas indiretas, o esforço será transmitido de uma barra para a outra, através de bielas de compressão inclinadas, ou por meio de aderência, deste modo haverá a participação do concreto e há a necessidade de um

cobrimento significativo de concreto, devido aos esforços de tração transversal, que também exigem armaduras transversais ou uma compressão transversal. Ainda segundo eles, nas emendas executadas por solda (emendas diretas), o concreto não participa da transmissão de esforços, então elas poderão ser executadas em qualquer posição da barra.

Carvalho e Figueiredo Filho (2007) sugerem que as emendas sejam evitadas na regiões de altos momentos, e em barras lisas tracionadas a emenda seja executada sempre com ganchos. Existe também limitações quanto ao número de barras a ser emendada em uma mesma seção, sendo que o cálculo varia de acordo com o método de emenda adotado.

A NBR 7480:2007 especifica os limites de resistência mínimos que o aço de cada categoria deve suportar (tabela 01), os quais devem ser alcançados na emenda com solda.

Tabela 01 - Valores mínimos de resistência para aço CA.

Categoria	Valores mínimos de tração				Ensaio de dobramento a 180°		Aderência	
	Resistência característica de escoamento f	Limite de resistência f	Alongamento após ruptura em 10 \varnothing A %	Alongamento total na força máxima A %	Diâmetro do pino mm		Coeficiente de conformação superficial mínimo	
					$\varnothing < 20$	$\varnothing \geq 20$	$\varnothing < 10$	$\varnothing \geq 10$
CA-25	250	1,20 f	18	-	2 \varnothing	4 \varnothing	1,0	1,0
CA-50	500	1,08 f	8	5	3 \varnothing	6 \varnothing	1,0	1,5
CA-60	600	1,05 f	5	-	5 \varnothing	-	1,0	1,5

Fonte: Tabela elaborada pelo autor conforme NBR 7480:2007.

2.2 Emendas de barras

2.2.2 Classificação das emendas

Conforme a NBR 6118:2014 e NBR 14931:2004, há a possibilidade de emendar as barras de aço por traspasse, por luvas com preenchimento metálico, rosqueadas ou prensadas, por solda, ou por outros dispositivos devidamente justificados.

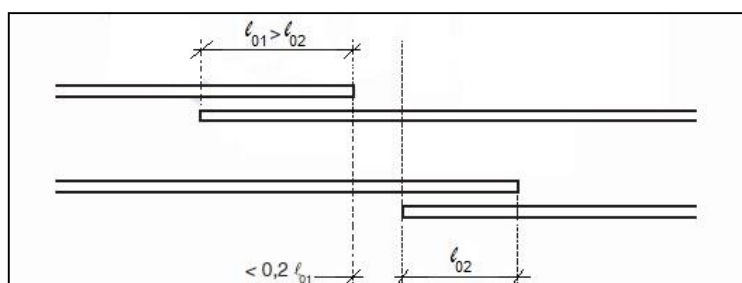
2.2.2.1 Emenda por traspasse

A emenda por traspasse, figura 01, transmite esforços através de aderência no concreto, segundo a NBR 6118:2014, é permitida a emenda por traspasse para barras com bitolas com diâmetro de até 32mm. Com a revisão da norma em 2014, as emendas em elementos que sofrem apenas tração podem ser executadas, desde que sejam tomados cuidados especiais. Há a mobilização de bielas comprimidas de concreto juntamente com o aparecimento de tensões transversais de tração quando a transmissão de esforços acontece, através do concreto situado entre as barras.

Fusco (2005) afirma que a emenda pode ser feita com barras quase em contato direto, quando elas possuem nervuras podem estar encostadas, pois suas nervuras garantem que o concreto penetre. Porém, a distância entre as barras não deve ultrapassar 4ϕ para que a transmissão de esforços seja eficiente.

Conforme a NBR 6118:2014, no item 9.5.2.1, é considerado como na mesma seção transversal as emendas que se superpõem ou cujas extremidades mais próximas estejam afastadas menos de 20% do comprimento do trecho de traspasse. Ainda, com diâmetro de barras diferentes, o cálculo do comprimento de traspasse deve ser calculado com base no maior diâmetro.

Figura 01 - Emenda por traspasse.



Fonte: NBR 6118:2014

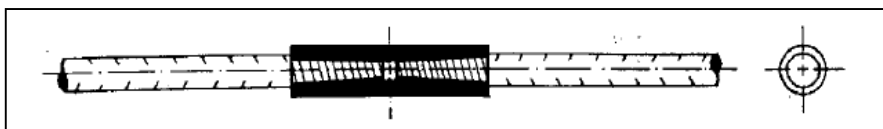
2.2.2.2 Emenda por luvas

A emenda por luvas pode ser feita através de luvas rosqueadas - figura 02-, metálicas ou preenchidas. Os procedimentos de execução de cada tipo de luva deve ser seguido conforme o fabricante.

Leonhardt e Mönnig (1977) falam que a rosca deve ser laminada para evitar o enfraquecimento da barra. Quando o aço nervurado é laminado em usina e esta nervura vem em forma de rosca em todo o seu comprimento, as luvas rosqueadas podem ser uma opção de emenda desde que a luva certa seja usada.

No cálculo do cobrimento e espaçamento entre barras, leva-se em consideração o diâmetro da luva. A NBR 14931:2004 recomenda que as luvas devem possuir resistência maior que a barra emendada.

Figura 02 - Exemplo de luva rosqueada.



Fonte: NBR 8548:1984

2.2.2.3 Emendas de barras com solda

De acordo com Fusco (1995), as emendas por soldas podem ser realizadas de topo ou por meio de cordões longitudinais em emendas sobrepostas, além de citar que nas emendas longitudinais os esforços produzidos pela afastamento em relação ao centro precisam ser suportados por uma armadura transversal e que o comprimento mínimo da solda seja igual a 10 vezes o diâmetro.

Leonhardt e Mönnig (1977), dizem que só devem ser soldadas barras de aço do mesmo tipo. Fusco (1995) também cita que principalmente nos aços encruados a frio ou tratados termicamente, as características de soldabilidade devem ser respeitadas quando empregado emenda por solda.

A durabilidade da emenda soldada dependerá da sua correta execução, o que leva em conta a compatibilidade química entre os componentes. Na europa a norma UNE 36.068:94 (*Una Norma Española*), conforme apresentado por Montoya (2001), regulamenta as propriedades químicas do aço para que as barras de aço nervuradas possam ser soldadas, pois elas reagem quimicamente com a solda, e estando em excesso podem prejudicar o resultado final. A NBR 6118:2014 cita que para um aço ser considerado soldável deve respeitar os limites de composição química estabelecidos na NBR 8965:1985.

A DIN 1045 (*Deutsches Institut für Normung*), conforme Leonhardt e Mönnig (1977), cita que em uma mesma seção transversal todas as barras podem conter emendas, porém, estes autores não recomendam tal procedimento já que possibilitaria a formação de fissuras no concreto.

As emendas não devem ser executadas em seções da peça que haja predominância de solicitação de variação, assim o risco de ruptura por fadiga será

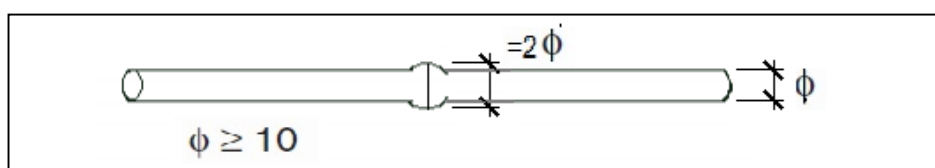
diminuído. A ruptura por fadiga acontece quando há na seção estado triplo de tensões de tração ou descontinuidades estruturais, deixando o material frágil. Portanto, de acordo com Fusco (1995), as emendas no dobramento da barra deveriam ser evitadas, pois acontece o encruamento do material na dobra, causando assim sua fragilidade. Mas, Leonhardt e Mönnig (1977) citam que é permitido atualmente, emendar peças curvas, desde que o início desta esteja a no mínimo 4ϕ da extremidade do local da solda. Se a distância não for respeitada, o diâmetro do pino do dobramento deverá ser maior ou igual a 20 vezes o diâmetro.

2.2.2.3.1 Solda de topo por caldeamento

Este tipo de ligação é normalmente usada para emendar sobras de aço, pois o processo é feito em uma máquina especializada, onde segundo Andrade e Secco (2015), a temperatura para emenda chega a 1100°C , e as barras são prensadas até a emenda atingir duas vezes o diâmetro (2ϕ). Por este motivo, este procedimento torna-se impossível de ser executado em alguns casos, como emendas de esperas de pilares.

A NBR 6118:2014, assim como a NBR 8800:2008 especificam que na aplicação do método de solda por caldeamento (figura 03), a bitola do aço não poderá ser menor a 10mm.

Figura 03 - Solda de topo por caldeamento.



Fonte: Desenho elaborado pelo autor conforme NBR 6118:2014

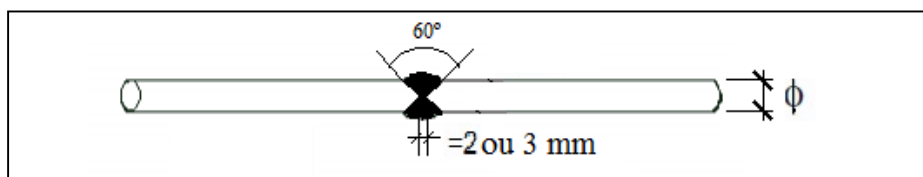
2.2.2.3.2 Solda de topo com Eletrodo

Sua recomendação é para pequenos números de emendas, necessitando o emprego de eletrodo cujas características dependem do diâmetro das barras a serem soldadas e do aço a ser usado. Os esforços de uma barra à outra são transmitidas direta e concêntricamente através da solda.

Fusco (1995) fala que a recomendação é que para a solda de topo com eletrodo, as extremidades sejam preparadas em formato de X com ângulo de 60°

conforme figura 04, para que o material do eletrodo se deposite eficientemente, virando as barras e soldando de modo simétrico. Porém, segundo Montoya (2001), se no local de aplicação da solda não for possível virar as barras, o preparo deverá se feito em formato de U ou V, mas em diâmetros grandes esta forma assimétrica não é recomendada. Neste método, admite-se o diâmetro $\geq 20\text{mm}$, com filete de solda de 2 a 3mm.

Figura 04 - Solda de topo com eletrodo.

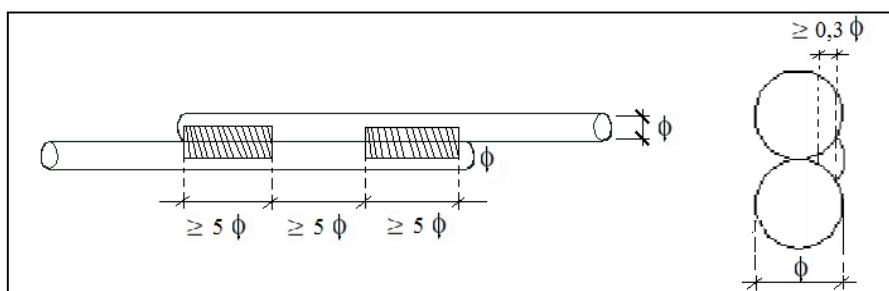


Fonte: Desenho elaborado pelo autor conforme NBR 6118:2014

2.2.2.3.3 Solda por traspasse

Como a transmissão de esforços dá-se através da solda, Leonhardt e Mönnig (1977) consideram que neste tipo de solda, feito com filete interrompido de um só lado, a carga transmitida de uma barra à outra é a mesma suportada pela barra sozinha. Devido à excentricidade que ocorre, haverá um desvio do fluxo dos esforços que precisará ser absorvido por uma armadura transversal. A NBR 6118-2014 recomenda que é necessário no mínimo dois cordões longitudinais (figura 5), podendo ser executada em barras de qualquer diâmetro, com comprimento maior ou igual a cinco vezes o diâmetro da barra ($\geq 5\phi$) cada um, e espaçamento de também cinco vezes o diâmetro ($\geq 5\phi$) entre eles. Ainda diz que a espessura do filete de solda deve ser $\geq 0,3\phi$, conforme a figura 05. Para barras em que as tensões cisalhantes serão de valores elevados, isto levará a um escoamento localizado do material ocorrendo uma deformação plástica que leva à fadiga da solda, e segundo Leonhardt e Mönnig (1977), este método não está adequado para suportar este tipo de fenômeno.

Figura 05 - Solda por traspasse.

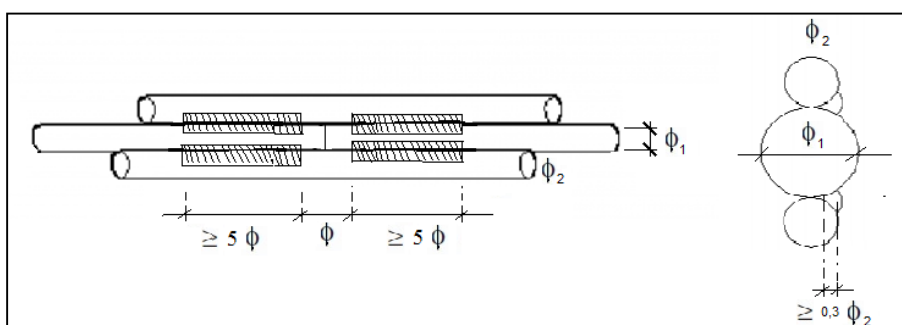


Fonte: Desenho elaborado pelo autor conforme NBR 6118:2014

2.2.2.3.4 Solda com barras justapostas

Neste tipo de emenda, as barras são colocadas justapostas como na figura 06, e são executados cordões de solda longitudinais com espaçamento entre eles com valor maior ou igual o diâmetro da barra ($\geq \phi$), e tendo valor maior ou igual a cinco vezes o diâmetro da barra ($\geq 5\phi$) cada cordão de solda. É necessário que o centro de massa do conjunto coincida com o eixo longitudinal das barras emendadas, e a espessura da solda deverá ser maior ou igual a 0,3 vezes o diâmetro da barra ($\geq 0,3\phi$). Assim como a emenda por traspasse com solda, este também é pouco adequado à variações de solicitação.

Figura 06 - Emenda com solda com barras justapostas.



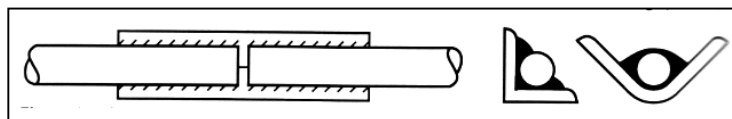
Fonte: Desenho elaborado pelo autor conforme NBR 6118:2014

2.2.2.3.5 Solda com cobrejuntas

É um método citado por Leonhardt e Mönnig (1977) e ainda por Fusco (1995). Pode ser executada colocando cantoneiras para emendar as barras e soldar os lados (figura 07), ou mesmo fazendo o uso de resto de aços. É preciso obter a menor excentricidade possível para os cordões de solda. Conforme Fusco (2005),

este é outro tipo de emenda que não é aconselhada para o caso de barras solicitadas à fadiga.

Figura 07 - Solda com cobrejuntas.



Fonte: Fusco (2005).

2.3 Soldabilidade de aços estruturais

Para a confecção das armaduras das peças estruturais há a disponibilidade de diversos tipos de barras e fios de aços. Pfeil (2009) fala que a soldabilidade dos aços reflete na maior ou menor facilidade de se obter uma solda sem fraturas e resistente. Chiaverini (1996) afirma que a soldabilidade dos aços CA é uma característica muito importante, visto que a emenda por solda destes aços é uma prática bastante comum. Por esta razão, nos últimos anos, a indústria vem buscando melhorar a fabricação do aço, tentando obter um produto com formulações químicas mais facilmente soldável.

A denominação CA das barras e fios de aço indica seu emprego no concreto armado, as barras são fabricadas por laminação a quente e os fios por trefilação. As barras de aço tem diâmetros padronizadas conforme a NBR 7480:2007, e sendo CA-25 para barras lisas, CA-50 nervuradas e CA-60 os fios de aço.

Embora a NBR 7480:2007 possua alguns critérios específicos para as barras e fios de aço para concreto armado, no que diz respeito a soldabilidade deste tipo de material, a norma manda buscar referência na NBR 6118:2014, e esta por sua vez faz referência a NBR 8965:1985, que contém os teores máximos de elementos químicos para considerar o aço soldável.

Segundo Pfeil (2009) e Chiaverini (1996), os aços com composição de carbono até 0,25% C e 0,80% Mn não necessitam de cuidados especiais para execução da solda, já os que possuem teor maior que 0,30% C, é necessário fazer um preaquecimento do metal base juntamente com um resfriamento lento da solda, já que possuem ductibilidade muito pequena.

No geral, independente das propriedades mecânicas do aço, seja ele de baixa liga com ou sem tratamento térmico, todos podem ser soldados, é só verificar qual o

procedimento correto a ser seguido, adotando o eletrodo adequado e fazer preaquecimento se necessário.

A NBR 8800:2008 apresenta a tabela de compatibilidade de metal base com o metal solda (figura 08), retirada da AWS D1.1 (*American Welding Society*), (figura 08), onde faz as recomendações do tipo de aço a ser usado, tipo de procedimento e eletrodo. Para especificações incluindo temperatura de preaquecimento e interpasses, é necessário consultar a AWS D1.1, assim como para outros procedimentos que não estejam descritos na NBR 8800:2008.

Figura 08 - Compatibilidade solda com o metal base.

	Metal-base		Metal da solda compatível			
	ABNT	ASTM	Arco elétrico com eletrodo revestido	Arco submerso (SAW)	Arco elétrico com proteção gasosa (GMAW)	Arco elétrico com fluxo no núcleo (FCAW)
Grupo I	NBR 6648 (CG-26- ≤20mm) NBR 6649 (CF-26) NBR 6650 (CF-26) NBR 7007 (MR 250 - ≤19mm)	A36 (t≤19mm) A500 Grau A A500 Grau B	AWS A5.1- E60XX, E70XX AWS A5.5 ^e - E70XX-X	AWS A5.17- F6XX-EXXX, F6XX-ECXXX, F7XX-EXXX, F7XX-ECXXX AWS A5.23 ^e - F7XX-EXXX- XX, F7XX- ECXXX-XX	AWS A5.18- ER70S-X, E70C-XC, E70C-XM (exceto -GS) AWS A5.28 ^e - ER70S-XXX, E70C-XXX	AWS A5.20- E6XT-X, E6XT- XM, E7XT-X, E7XT-XM (exceto -2, -2M, - 3, -10, -13, -14 e GS e exceto -11 com espessura superior a 12mm) AWS A5.29 ^e - E6XTX-X, E6XT- XM, E7XTX-X,
Grupo II	NBR 5000 (G-30) NBR 5000 (G-35) NBR 5004 (F-32/Q- 32) NBR 5004 (F-35/Q-35) NBR 5004 (Q-40) NBR 5008 (CGR 400) ^d NBR 5008 (CGR 500) ^d NBR 5008 (CGR 500A) ^d NBR 5920 (CFR 500) ^d NBR 5921 (CFR 400) ^d NBR 5921 (CFR 500) ^d NBR 6648 (CG-26- t>19mm) NBR 6648 (CG-28) NBR 6649(CF-28) NBR 6650 (CF-28) NBR 6650 (CF-30) NBR 7007 (MR 250 - t>19mm) NBR 7007 (AR- 350) NBR 7007 (AR-350 COR)	A36 (t>19mm) A242 ^d A572 Grau 42 A572 Grau 50 A572 Grau 55 A992 A588 ^d	AWS A5.1 - E7015, E7016, E7018, E7028 AWS A5.5 ^e - E7015-X, E7016-X, E7018-X	AWS A5.17 - F7XX-EXXX, F7XX-ECXXX AWS A5.23 ^e - F7XX-EXXX- XX, F7XX- ECXXX-XX	AWS A5.18 - ER70S-X, E70C-XC, E70C-XM (exceto -GS) AWS A5.28 ^e - ER70S-XXX, E70C-XXX	AWS A5.20 - E7XT-X, E7XT- XM (exceto -2, - 2M, -3, -10, -13, - 14 e -GS e exceto -11 com espessura superior a 12mm) AWS A5.29 ^e - E7XTX-X, E7XTX-XM
Grupo III	NBR 5000 (G-42) NBR 5000 (G-45) NBR 5004 (Q-42) NBR 5004 (Q-45) NBR 7007 (AR- 415)	A572 Grau 60 A572 Grau 65 A913 ^C	AWS A5.5 ^e - E8015-X, E8016-X, E8018-X	AWS A5.23 ^e - F8XX-EXXX- XX, F8XX- ECXXX-XX	AWS A5.28 ^e - ER80S-XXX, E80C-XXX	AWS A5.29 ^e - E8XTX-X, E8XTX-XM

Fonte: Tabela 07 retirada da NBR 8800:2008.

2.4 Principais processos de soldagem

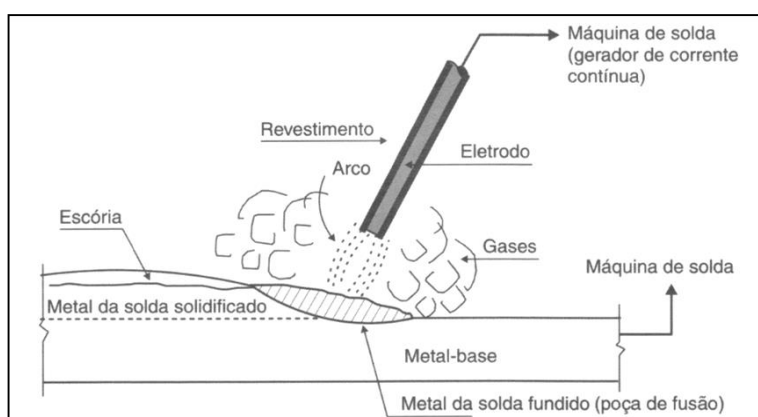
A soldagem baseia-se em unir o metal base com o metal solda, formando uma união sólida para que um elemento monolítico seja criado, e os esforços continuem sendo distribuídos de uma barra à outra.

Durante o processo de soldagem, os componentes químicos do eletrodo entram em fusão, e não possuindo proteção, reagem com o oxigênio ao seu redor, ficando assim com resistência menor que a do metal base. O processo de soldagem por arco elétrico é o mais viável para evitar contaminações durante o processo de soldagem, comparado a uma câmara a vácuo. Ele impedirá reações com a atmosfera, e que materiais se depositem na solda durante a execução.

Este processo de soldagem pode ser feito de diversos modos, Pinheiro (2001) e ainda a norma AWS 1.1 citam o SMAW, o SAW, o GMAW e o FCAW, assim como a NBR 6118:2014 cita a solda por caldeamento.

- SMAW (*Shield Metal Arc Welding*) - Mais conhecido como processo do arco elétrico com arco revestido. O revestimento do arco é produzido para no momento da fusão transformar-se em gás (figura 09), que envolve a solda evitando a porosidade e dando maior penetração à solda.

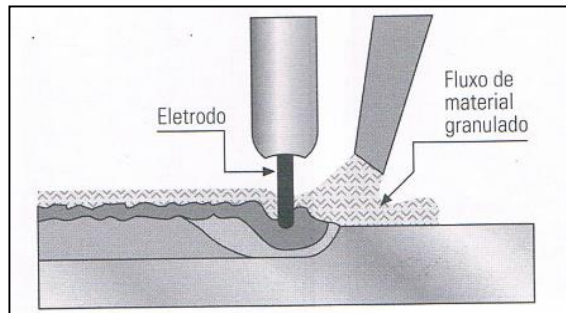
Figura 09 - Processo soldagem SMAW .



Fonte: Pfeil (2009)

- SAW (*Submerged Arc Welding*) - Solda de arco submerso. O processo é feito utilizando um eletrodo juntamente com um jato de material granulado que funciona como isolante térmico (figura 10). Esse fluxo forma uma escória que é solidificada, só é usada em soldas contínuas e planas.

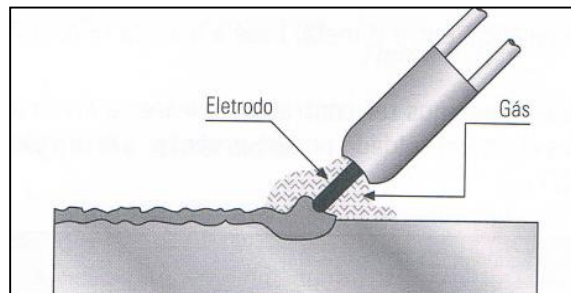
Figura 10 - Soldagem com processo SAW.



Fonte: Pinheiro (2001)

- **GMAW (Gas Metal Arc Welding)** - Solda ao arco elétrico com proteção gasosa. Juntamente com o eletrodo o gás é expelido (figura 11), formando uma proteção ao redor da solda para não aderir escórias. Esta é um dos processos mais flexíveis pois pode ser usado em todas as posições, podendo também ser executado ao ar livre, só é preciso proteção contra o vento.

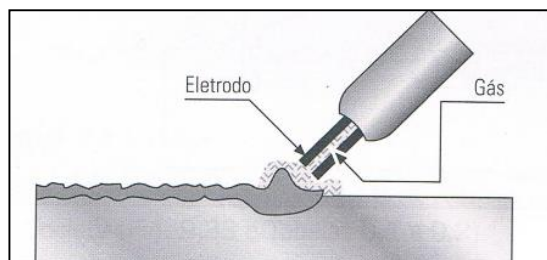
Figura 11 - Processo GMAW.



Fonte: Pinheiro (2001)

- **FCAW (Flux Cored Arc Welding)** - Solda ao arco elétrico com fluxo no núcleo. Processo semelhante ao GMAW, só que o gás sai de dentro do eletrodo conforme a figura 12.

Figura 12 - Processo de soldagem por FCAW.



Fonte: Pinheiro (2001)

- **Solda por resistência elétrica** - Feita por caldeamento, é utilizado para peças pequenas na união de barras de CA-25 e CA-50-A.

2.5 Eletrodos

Os eletrodos são feitos de materiais cuja composição básica é o carbono e manganês, mas para cada tipo de aço há uma classificação de eletrodo. Nos eletrodos revestidos, o material fica no núcleo, que é chamado alma, e seu revestimento varia de acordo com seu tipo, podendo ser de materiais orgânicos, minerais ou gases. No processo por arco voltaico, os eletrodos são varas de aço-carbono ou aço de baixa liga.

Para a designação dos eletrodos revestidos, é seguido a nomenclatura segundo a ASTM (*American Society for Testing and Materials*) - que é um órgão americano cujo trabalho é desenvolver e publicar normas para diversos materiais, produtos e serviços. Segue abaixo exemplo da designação de um eletrodo:

E60XY

Onde conforme Pfeil (2009) assim como Pinheiro (2001):

E= eletrodo

60=resistência à ruptura da solda em ksi

X= número referente à posição da solda - 1 para qualquer posição e 2 para posição horizontal.

Y= número que indica tipo de corrente e de revestimento do eletrodo.

Conforme a AWS D1.1 a unidade de medida ksi ou lbf/in² (libra por polegada ao quadrado) é a unidade usada nos Estados Unidos em substituição ao MPa para medir o valor resistido à tração de um material. Abaixo a relação de ksi para MPa:

01 ksi = 6,894757293178 MPa

As posições em que a soldagem pode ser realizada são: plana, vertical, horizontal e a sobrecarga, sendo esta última a mais difícil, devido sua dificuldade de execução em alguns lugares e a taxa de inclusão de escória é maior, pois a densidade da solda em relação ao metal base é menor. Para a soldagem no processo do arco elétrico com eletrodo revestido, os eletrodos da classe E60XX e E70XX fornecem resistência mecânica suficiente para a soldagem dos aços de concreto armado. Os eletrodos da classe E60XX possuem limite de escoamento de 60 ksi ou 415 MPa e eletrodos E70XX com 70ksi ou 485 MPa de limite de escoamento. Deste modo, a AWS D1.1 (*American Welding Society*) e AWS D1.4 recomendam o E7018 para soldagem de aços CA50, pois seu limite de escoamento e sua composição é compatível com o do aço.

2.6 Ligações Soldadas

Pfeil (2009) cita que unindo duas partes contíguas por meio de fusão, obteremos a união eficientemente do material, pois as partículas líquidas que estão em estado suspenso irão se unir para formar partículas maiores, chamando este processo de solda. Para provocar esta fusão, é necessário energia de origem elétrica, química, óptica ou mecânica. Na construção civil, as soldas mais empregadas são as com energia elétrica.

Esta fusão do aço é provocada pelo calor produzido por um arco de corrente elétrica, que se dá entre o eletrodo e o metal base, ocorrendo deposição do material do eletrodo na peça.

A peça a ser soldada precisa estar isolada da atmosfera, pois seu contato pode gerar a formação de impurezas na solda, para isto há diferentes tipos de isolamento: arco submerso em material granular fusível, arco elétrico com proteção gasosa, arco elétrico com fluxo no núcleo e eletrodo manual revestido.

O isolamento mais usual é o eletrodo revestido, pois seu processo apresenta grande versatilidade, podendo ser empregado em qualquer tipo de obra. Nele, o revestimento é consumido junto com o eletrodo, e parte se transforma em escória e a outra em gases inertes. Esta escória deve ser retirada após o resfriamento.

A solda deve ser sempre executada em condições controladas, devido a sua grande sensibilidade a defeitos, lembra Pfeil (2009). Ainda segundo ele, a norma americana AWS D1.1 (*American Welding Society*) regula a execução de solda estrutural, e inclui técnicas, qualificação dos soldadores e procedimentos de inspeção, no Brasil a NBR 8800:2008 é baseada na AWS D1.1.

Dentre os defeitos que a solda pode apresentar os principais são:

- Fraturas a frio: a ZTA (zona termicamente afetada) é a zona adjacente à poça de fusão entre o metal-base e o metal da solda, e sua microestrutura sofre modificação após o calor interno sofrido no processo, ficando diferente do material base. Assim, estando fragilizada, com o resfriamento rápido pode acontecer fraturas de ação mecânica. Para evitar, há a opção de fazer o preaquecimento do metal base para controlar o resfriamento do material, ou com eletrodos com revestimentos de carbonato de sódio (baixo hidrogênio).
- Fraturas a quente: ocorrem no momento da execução da solda, quando impurezas penetram nesta, normalmente enxofre e fósforo.

- Fusão incompleta: quando o equipamento não está regulado na amperagem correta pode ocorrer a falta ou o excesso de corrente. Na fusão incompleta ocorre a falta de corrente, fazendo com que a solda não consiga atingir a temperatura ideal de aquecimento e não consiga ser depositada em sua totalidade dentro do material base.
- Porosidade: também acontece por falta de regulagem correta de equipamento, quando a corrente está muito alta, e na incorreta execução da emenda, deixando a chapa muito longe do eletrodo, o que acarretará a retenção de bolhas de gás na solda.
- Inclusão de escória: quando a solda é executada em camadas, e após cada uma não é feita a retirada da escória antes de executar a próxima camada de solda.

2.6.1 Tipos de ligações soldadas

A NBR 8800:2008 é baseada na norma americana AWS D1.1-82 e regula os processos de soldagem e as técnicas de execução de estruturas metálicas. O procedimento de soldagem do início ao fim não está definido no Brasil, então a norma sugere seguir o processo descrito na AWS. No seu dimensionamento, o tipo de eletrodo, a área de contato a as dimensões previstas em norma devem ser levadas em conta.

Dependendo da posição da peça a ser soldada temos um tipo de solda a ser executada. Pfeil (2009) e ainda Pinheiro (2001), de acordo com a NBR 8800:2008 citam que os tipos de execução de solda podem ser de entalhe, tampão ou filete.

2.6.1.1 Entalhe

Solda por entalhe ou também chamada de solda de chanfro (figura 13). Este tipo de solda pode ser usada com penetração total ou parcial, depositando-se a solda dentro de chanfros, que podem ser de diversas formas (X, V, U, etc..) dependendo do projeto.

Figura 13 - Solda de entalhe com penetração total.



Fonte: Desenho elaborado pelo autor.

Devido a deposição do material da solda dentro dos chanfros, isto confere à emenda uma maior área de aderência, então, segundo a CBCA (Centro brasileiro da Construção em aço -1987), quando há a necessidade de realizar um trabalho onde necessite que as arestas da solda sejam retiradas, a solda de entalhe é a recomendada. Ela garante a continuidade total, ou parcial, da espessura do elemento soldado na transmissão de esforços através da ligação. Normalmente ela gera mais custo pois é necessário o trabalho de execução dos chanfros e quando necessário o aparo das arestas.

Todas as especificações como comprimento da solda, retorno e tipo de solda a ser utilizada devem ser indicadas no desenho do projeto. Conforme Pfeil (2009), é necessário saber a menor distância da raiz da solda até sua face para calcular a área efetiva da solda de entalhe, essa distância é chamada de garganta efetiva. O menor lado do comprimento da solda será chamado de perna. A especificação da NBR 8800:2008 é que o produto da espessura da garganta efetiva e o comprimento efetivo da solda resultará em sua área efetiva.

Como a solda de entalhe é geralmente para total preenchimento do espaço das peças a serem ligadas (penetração total), utiliza-se então, a seção do metal base de menor espessura para o cálculo. Para o preenchimento incompleto (penetração parcial), quando o ângulo na raiz do entalhe é de 45° a 60°, usando chanfro em bisel, a espessura efetiva t_e é igual a profundidade y do entalhe menos 3 mm, (exceto na soldagem com proteção gasosa ou com fluxo no núcleo em posições plana e horizontal quando adota-se $t_e=y$), para ângulos da raiz do entalhe maiores que 60°, com chanfros em bisel ou em V, t_e é igual a profundidade do entalhe.

A espessura da garganta efetiva de uma solda total deve ser igual a menor das espessuras das partes soldadas, enquanto que para as soldas de penetração parcial a NBR 8800:2008 limita valores mínimos, como visto na tabela 02 retirada da norma.

Tabela 02 - Espessuras mínimas da garganta para solda em entalhe.

Menor espessura do metal-base na junta mm	Espessura mínima da garganta efetiva ^a mm
Abaixo de 6,35 e até 6,35	3
Acima de 12,5	5
Acima de 12,5 até 19	6
Acima de 19 até 37,5	8
Acima de 37,5 até 57	10
Acima de 57 até 152	13
Acima de 152	16

^a Ver 6.2.2 para definição de garganta efetiva

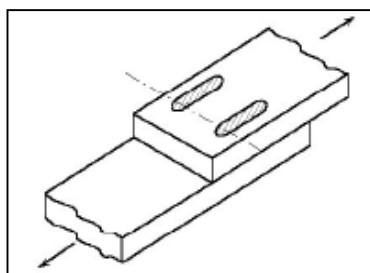
Fonte: Tabela retirada da NBR 8800:2008.

Para cálculos, é considerado como comprimento efetivo da solda de entalhe (parcial ou total) o seu comprimento real, e este deve ser igual a largura da parte ligada. Peças flexionadas não podem ser ligadas por solda de entalhe com penetração parcial.

2.6.1.2 Solda de tampão

As soldas de tampão ou de ranhura são orifícios circulares ou alongados cortados no metal base onde a solda é depositada (figura 14). É o tipo de solda menos utilizada. Ela pode ser utilizada para evitar a separação ou instabilidade das partes sobrepostas, ou transmitindo as forças paralelas para as superfícies de contato e ligar componentes de barras de seção composta.

Figura 14 - Solda de tampão.



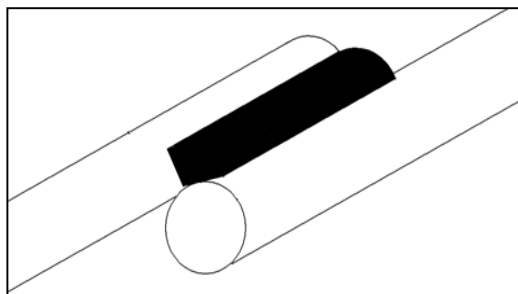
Fonte: Melconian (1997)

2.6.1.3 Filete

Soldas de filetes são cordões depositados nas faces laterais das peças a serem ligadas (figura 15). Possuem maior tolerância de ajuste das peças em

comparação a solda de entalhe, porém os esforços são alternados no material, o que aumentam a chance da causa de fadiga do mesmo.

Figura 15 - Solda de filete.



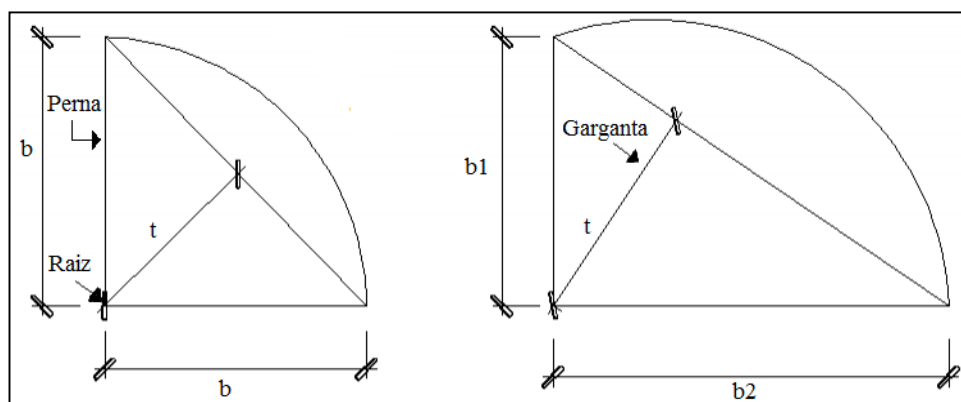
Fonte: Desenho elaborado pelo autor.

Conforme Pfeil (2009), para todos os cálculos que necessitem ser realizados para a solda de filete, devido a sua geometria, será necessário comparar os filetes com triângulos retângulos (figura 16). Eles serão designados pelos comprimentos dos seus lados, então um filete apresentado como filete de 10mm terá lados b iguais de 10mm, e outro filete 8mmX12mm possui lados 8mm e 12mm, mas na maioria dos casos seus lados serão de valores iguais.

A garganta do filete é a espessura desfavorável t , perna o menor lado do filete e raiz a interseção das faces de fusão. Para cálculo da área efetiva de filete com lado iguais tem-se a seguinte fórmula:

$$t = 0,7 b \quad (1)$$

Figura 16 - Esquema de solda em filete.



Fonte: Desenho elaborado pelo autor.

Em filetes com lados diferentes a fórmula abaixo deve ser usada:

$$t = b_1 b_2 / \sqrt{b_1^2 + b_2^2} \quad (2)$$

No caso das soldas realizadas pelo processo de arco submerso, pode-se adotar espessuras maiores já que este método é mais confiável, assim é adotado:

$$b \leq 10 \text{ mm} \quad t_e = b \quad (3)$$

$$b \geq 10 \text{ mm} \quad t_e = t + 3 \text{ mm} \quad (4)$$

O comprimento total da solda que inclui os retornos de extremidade será o comprimento efetivo ℓ visto na equação (1), excluindo-se os casos em que os filetes longitudinais estão sobre esforço axial. A hipótese usada no cálculo das solicitações, de que existe uniformidade na distribuição de tensões, não se aplica no caso de soldas longas ($L > 100b$), já que é adotado um fator de redução, afim de redistribuir esta desuniformidade. Abaixo a fórmula usada, quando ℓ é tomado igual ao comprimento L da solda.

$$\beta = 1,2 - 0,002L/b, \text{ sendo } 0,6 \leq \beta \leq 1,0 \quad (5)$$

Para garantir a completa fusão dos materiais, é necessário que a dimensão mínima (perna) do filete não ultrapasse a espessura da chapa mais fina, com exceção de necessidade de cálculo. Seguindo a tabela de espessuras mínimas da NBR 8800:2008, o resfriamento brusco da solda por condução de calor será evitado, diminuindo assim as chances de fraturas a frio e minimizando distorções.

Tabela 03 - Tabela de espessuras mínimas da perna do filete.

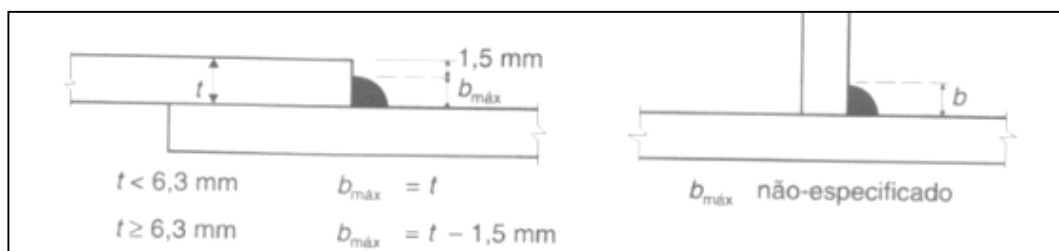
Menor espessura do metal-base na junta (mm)	Tamanho da perna da solda de filete d_w^a (mm)
Abaixo de 6,35 até 6,35	3
Acima de 6,35 até 12,5	5
Acima de 12,5 até 19	6
Acima de 19	8

^a Executadas somente com um passe

Fonte : Tabela retirada da NBR 8800: 2008.

Também é usada a espessura da chapa mais fina para adotar as dimensões máximas dos lados do filete. Quando tem-se $t=b$, há a redução da perna e da garganta efetiva da solda devido a fusão da quina superior da chapa, para evitar que isto ocorra, é deixado a distância de 1,5mm entre a quina e a solda, como mostra a figura 17:

Figura 17 - Execução solda de filete.



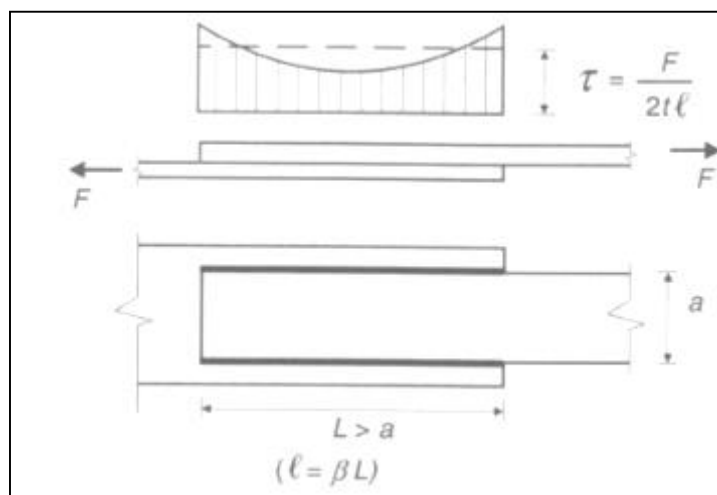
Fonte: Pfeil (2009).

A NBR 8800:2008 leva em consideração que quando um filete de solda tem comprimento L , em alguns trechos, a espessura da garganta efetiva da solda tem valor igual a zero, então baseada na norma americana, a AWS D1.1, o comprimento efetivo da solda não pode ser inferior a 4 vezes o valor da perna, nem a 40mm.

$$L \geq 4b \geq 40 \text{ mm} \quad (6)$$

Para soldar chapas planas tracionadas com filetes longitudinais, o comprimento dos filetes (L_w) deve ser maior ou igual a largura a da chapa como na figura 18, a imagem ilustra também os esforços que agem na emenda soldada, distribuindo a tensão cisalhante no comprimento dos filetes, enquanto o material encontra-se em seu regime elástico, ou seja, a tensão máxima suportada pela solda sem deformar suas características.

Figura 18 - Filetes longitudinais.



Fonte: Pfeil (2009).

2.7 Cálculo de resistência da solda

Pfeil (2009) assim como Melconian (1997) consideram que a ruptura da solda de filete se dará por cisalhamento a 45° (figura 19), ou seja, ocorrerá na garganta efetiva, assim, para cálculo da área mínima, é considerado a garganta efetiva desprezando-se o acabamento da solda:

$$A_w = t\ell \quad (7)$$

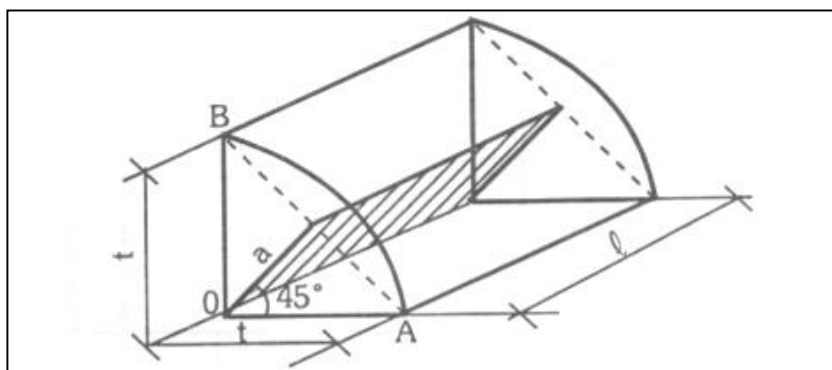
Onde:

A_w = área da solda

t = espessura da garganta

ℓ = comprimento efetivo

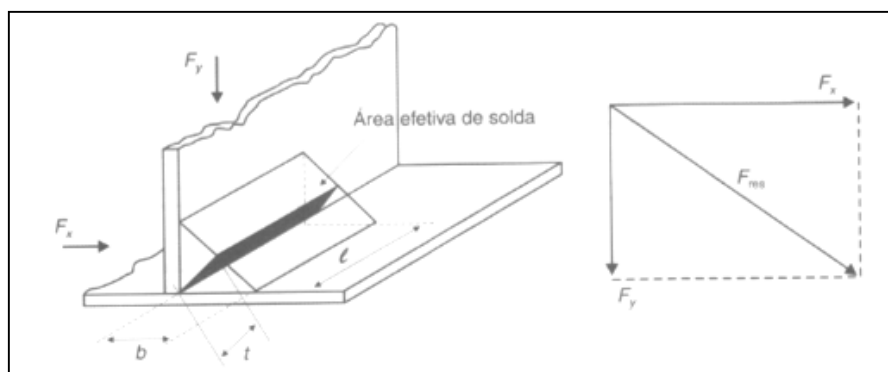
Figura 19 - Cálculo da área do filete.



Fonte: Melconian (1997)

Os esforços de tração e compressão que atuam na direção paralela da extensão da solda não são levados em consideração para efeito da resistência de cálculo do filete, mas deve ser considerado o cisalhamento que ocorre devido a transferência de esforços de uma chapa à outra, através da garganta de solda. Serão considerados como esforços cisalhantes, os esforços solicitantes em qualquer direção que formem ângulo reto com o eixo longitudinal da solda (figura 20).

Figura 20 - Esforços atuantes na solda.



Fonte: Pfeil (2009).

A ruptura do metal da solda é o estado limite. Assim, para cálculo da resistência temos:

$$R_d = A_w (0,60 f_w) / \gamma_{w2} \quad (8)$$

Onde é adotado:

f_w = tensão de escoamento da solda- para solda de 70 ksi o valor é 485MPa

$\gamma_{w2} = 1,35$ para combinações normais, especiais ou de construção ou

$\gamma_{w2} = 1,05$ para combinações excepcionais de ações

Determina-se a resistência da solda, que possui tensões não uniformes, levando em consideração o esforço por unidade de comprimento:

$$t(0,60 f_w) / \gamma_{w2} \quad (9)$$

Pfeil (2009) fala que quando a solda de filete contém o eixo com inclinação $\theta > 0$ em relação à força solicitante, a equação (8) subestima a resistência da solda, por este motivo, a NBR 8800:2008, no item 6.2.5.2.a, apresenta outra equação para a resistência em função do ângulo θ .

Em soldas de filetes que estejam situadas longitudinal e transversalmente à força aplicada, o cálculo da resistência da solda é feito a partir de duas equações, sendo que o resultado será o maior valor obtido entre elas. A primeira utiliza-se a equação (5) para calcular R_{dt} e R_{dl} , e os resultados são somados obtendo-se R_d . A segunda utiliza-se a equação a seguir:

$$(0,85R_{dl} + 1,5R_{dt}) \quad (10)$$

2.8 Distribuição dos esforços nas soldas.

No cálculo das tensões de distribuição de esforços, conforme Pfeil (2009), não importa a direção do esforço aplicado nas soldas de filete, sempre será considerado que as forças aplicadas na solda são de cisalhamento na seção da garganta. Como é mostrado na figura 20 da página 36, calculam-se as tensões na garganta com as fórmulas:

$$\tau_x = F_x / t \ell \quad (11)$$

$$\tau_y = F_y / t \ell \quad (12)$$

Onde:

t = garganta efetiva

ℓ = comprimento

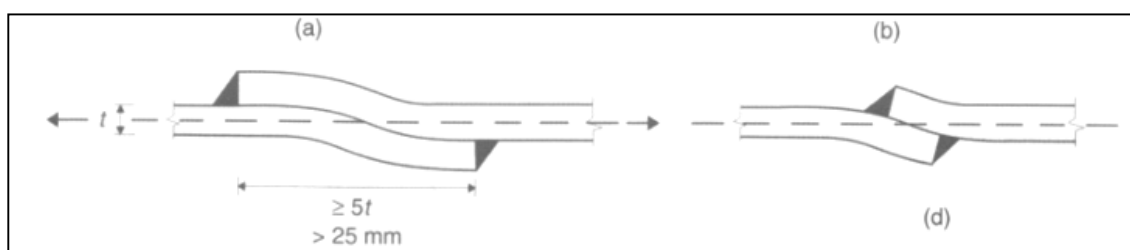
F_y = força aplicada na direção vertical

F_x = força aplicada na direção horizontal

As tensões de maior valor encontram-se nas extremidades, porém próximo à ruptura, que ocorre no estado limite último, as deformações plásticas que estão nas extremidades reorganizam as tensões existentes em todo o comprimento da solda, formando um diagrama uniforme. Porém, se o comprimento da solda é muito longa, a redistribuição das tensões rompe nas extremidades antes da região central, por este motivo as normas recomendam utilizar a fórmula (5) de redução de comprimento.

Para emendar filetes oblíquos, a NBR 8800:2008 determina comprimento mínimo de $> 25\text{mm}$ e $\geq 5t$ para traspasse, afim de evitar giros na emenda, as tensões serão consideradas como constantes.

Figura 21 - Emendas de filetes transversais.



Fonte: Pfeil (2009).

2.9 Procedimentos conforme as normas

2.9.1 Ensaio de tração

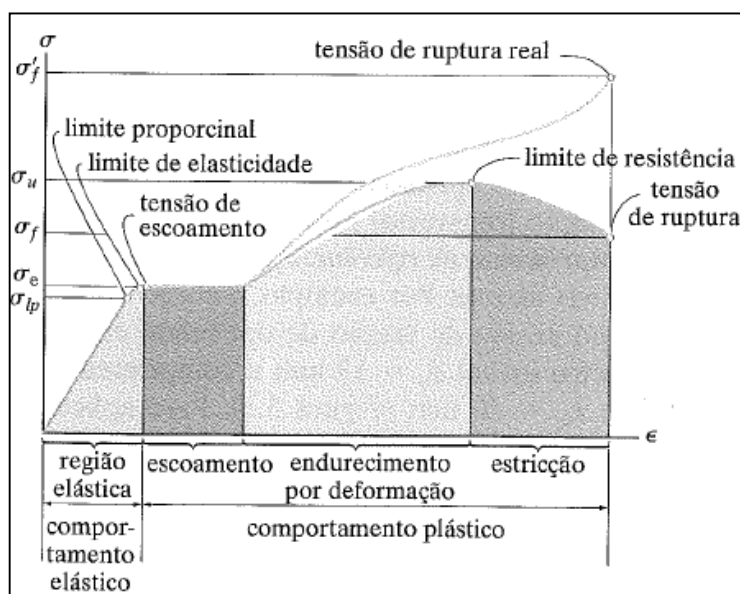
Como visto anteriormente, Leonhardt e Mönning (1977) citam que as emendas nas armaduras devem produzir um elemento monolítico, sendo assim, após a execução da solda, o ensaio de tração é realizado a fim de verificar se as propriedades do aço continuam iguais.

Conforme Hibbeler (2010) a resistência de um material depende de sua capacidade de suportar uma carga sem deformação excessiva ou ruptura. Essa propriedade é específica de cada material e é determinada por ensaios experimentais, onde o mais importante é o ensaio de tração.

Para o ensaio, corpos de prova padronizados são preparados. Depois o corpo de prova é acoplado na máquina universal de ensaio de tração, é medido seu comprimento inicial, e a máquina começa a aplicar uma força que aumenta gradativamente até que o corpo de prova seja rompido.

A máquina fornece os valores máximos de resistência do material, e o gráfico tensão x deformação que é obtido através da medição constante da deformação que o material sofre a cada variação de força aplicada.

Figura 22 -. Gráfico tensão x deformação do aço, não está em escala.



Fonte: Hibbeler (2010).

No gráfico é observado as fases que o material passa até a sua ruptura. Para a determinação da tensão nominal divide-se a força máxima aplicada pela área da seção do material, conforma a fórmula 13.

$$\sigma = F / A \quad (13)$$

E a deformação específica é obtida através da fórmula abaixo:

$$\varepsilon = \Delta L / L_0 \quad (14)$$

Onde:

δ = variação do comprimento

L_0 = comprimento inicial

No ensaio de tração é obtida a resistência de escoamento do aço, assim como seu alongamento, e os resultados são comparados com a NBR 7480:2007, onde os valores mínimos para cada tipo de aço está especificado, conforme tabela 04 abaixo.

Tabela 04 - Valores de tração do aço.

Categoria	Valores mínimos de tração			
	Resistência característica de escoamento f_{yk} MPA	Limite de resistência f_{st} MPA	Alongamento após ruptura em 10 \varnothing A %	Alongamento total na força máxima A_{gt} %
CA - 25	250	1,20 f_y	18	-
CA - 50	500	1,08 f_y	8	5
CA - 60	600	1,05 f_y	5	-

Fonte: Tabela elaborada pelo autor conforme NBR 7480:2007.

No ensaio de tração, feito conforme a NBR 7480:2007, a resistência de escoamento pode ser definida por um grau no diagrama tensão-deformação ou ser calculada pelo valor da tensão sob a carga correspondente para a deformação permanente de 0,2% ou para deformação de 0,5%, havendo divergências, adotar o valor que é obtido na deformação permanente. O comprimento inicial L_0 é determinado como sendo 10 diâmetros nominais.

3 MATERIAIS E MÉTODOS DE PESQUISA

3.1 Métodos de pesquisa.

Primeiramente, foi feito um estudo nas normas vigentes brasileiras e estrangeiras e de bibliografias técnicas reconhecidas, afim de estabelecer um parâmetro de referencial teórico para a emenda de aço para concreto armado através de solda por traspasse.

Com base neste estudo, percebeu-se que variações no comprimento das emendas ainda não haviam sido testadas. Deste modo, há a possibilidade de testar a redução do comprimento do filete de solda afim de facilitar a execução das emendas em obras.

São testadas barras com diâmetro de 8mm, 10mm e 12,5mm primeiramente sem emenda, que serão submetidas ao ensaio de tração para confirmar se estas atendem os requisitos mínimos exigidos na NBR 7480:2007. Posteriormente, amostras destas mesmas barras serão emendadas com solda por traspasse conforme proposto pela NBR 6118:2014 e NBR 14931:2007, para servir de parâmetro para a redução do comprimento da solda.

Outras 03 amostras serão executadas com emendas possuindo comprimento inferior da descrita na norma. Os modelos 02 e 03 são calculados como ligações soldadas, relacionando a área da seção da barra com o seu limite de escoamento, e comparando os resultados com a resistência calculada da solda. Desta forma é encontrado qual o menor comprimento de filete pode ser executado e realizado o ensaio de tração para confirmação da resistência da barra. Os resultados dos modelos propostos serão comparados com os resultados das barras sem emenda e com emenda descrita na norma.

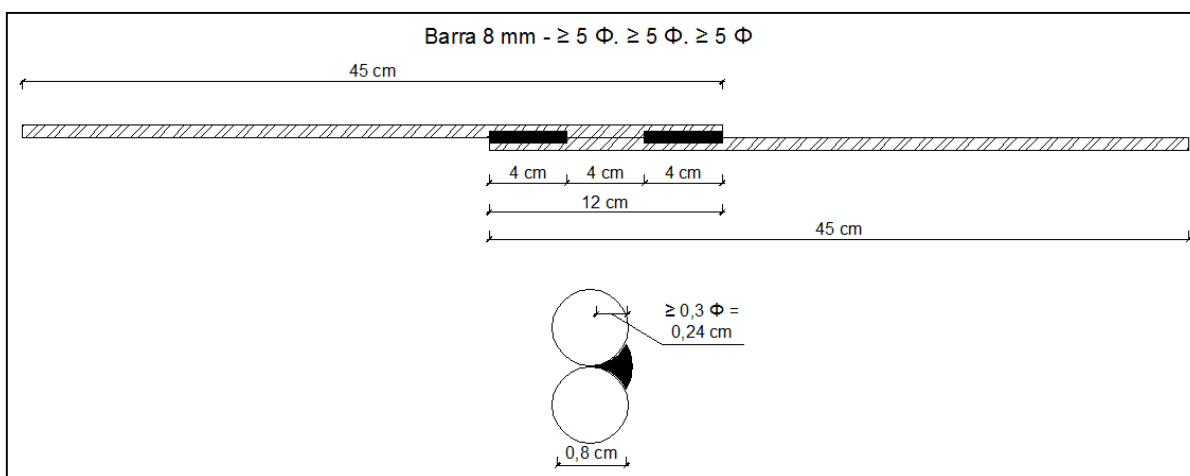
3.2 Definição dos modelos.

Para servir de referência para os resultados obtidos nas variações das emendas a serem testadas, foram soldadas barras conforme a NBR 6118:2014 e NBR 14931:2004, estas serão denominadas barras de testemunho. Nas normas a recomendação é que a solda seja executada com dois filetes longitudinais de

comprimento maior ou igual a 5 vezes o diâmetro ($\geq 5\phi$), e espaçamento entre eles de também maior ou igual a 5 vezes o diâmetro ($\geq 5\phi$).

Foi elaborado um detalhamento e entregue ao profissional para que o mesmo seguisse os comprimentos especificados na norma para execução da solda. Na figura 23 pode-se observar o detalhamento da barra testemunho de diâmetro de 8mm, que foi feito a partir das especificações das normas.

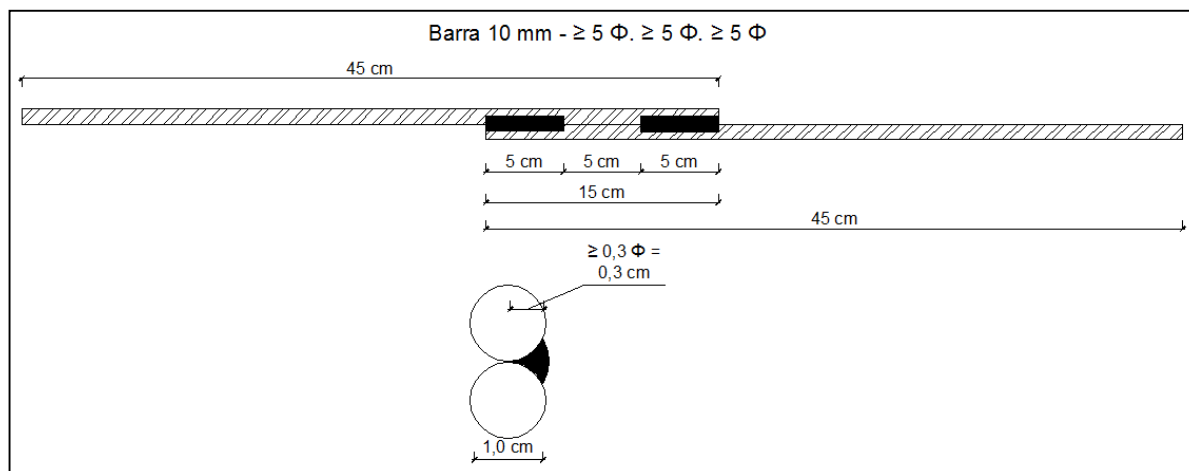
Figura 23 - Barra testemunho diâmetro 8mm com comprimento de solda de $\geq 5\phi$. $\geq 5\phi$. $\geq 5\phi$.



Fonte: Detalhamento elaborado pelo autor conforme NBR 6118:2014.

Na figura 24, segue o detalhamento de emenda da barra testemunho conforme especificações das normas para a barra de diâmetro 10mm.

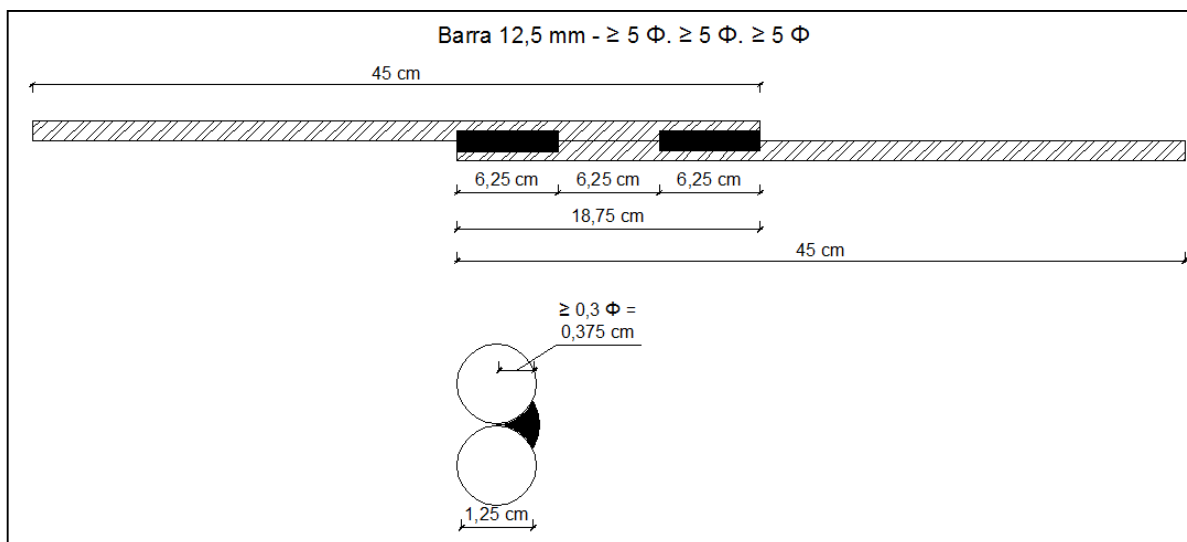
Figura 24 - Barra testemunho diâmetro 10mm com comprimento de solda de $\geq 5\phi$. $\geq 5\phi$. $\geq 5\phi$.



Fonte: Detalhamento elaborado pelo autor conforme NBR 6118:2014.

Do mesmo modo, na figura 25 abaixo, observa-se o detalhamento da barra testemunho de diâmetro 12,5mm elaborado conforme as normas.

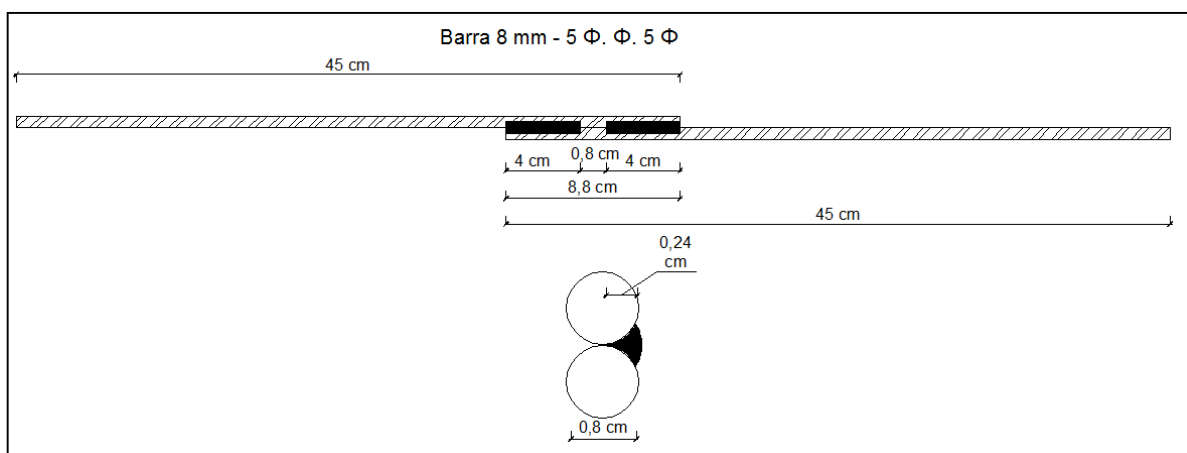
Figura 25 - Barra testemunho diâmetro 12,5mm com comprimento de solda de $\geq 5 \phi$. $\geq 5 \phi$. $\geq 5 \phi$.



Fonte: Detalhamento elaborado pelo autor conforme NBR 6118:2014.

Para definir o primeiro modelo de variação do comprimento na solda, manteve-se o comprimento dos filetes com 5 vezes o diâmetro ($5 \cdot \phi$) e se variou somente o espaçamento entre eles, optando pelo comprimento de somente uma vez o diâmetro ($1 \cdot \phi$), ficando então com comprimento total de $5 \phi \cdot \phi \cdot 5 \phi$ conforme detalhamento exposto na figura 26.

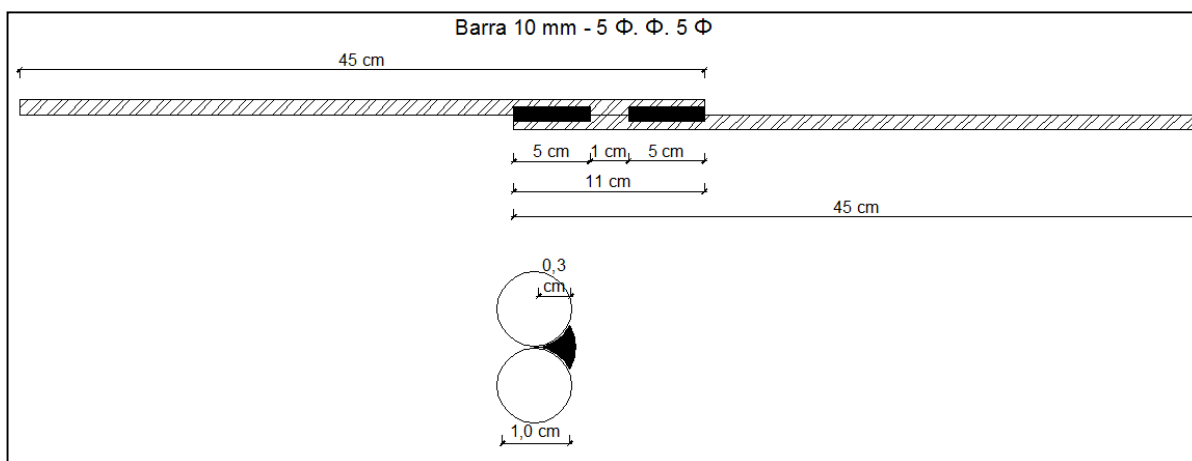
Figura 26 - Primeiro modelo de variação para barra diâmetro 8mm. $5 \phi \cdot \phi \cdot 5 \phi$



Fonte: Detalhamento elaborado pelo autor.

Segue então, para visualização do comprimento total da emenda, na figura 27, o detalhamento para a barra de diâmetro 10mm.

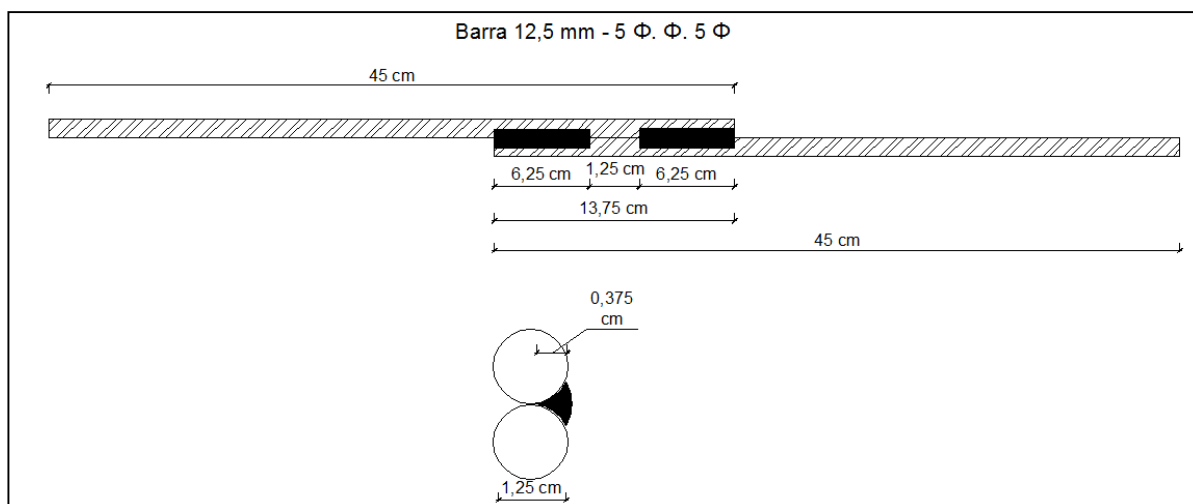
Figura 27 - Primeiro modelo de variação para barra diâmetro 10mm - 5 ϕ . ϕ . 5 ϕ



Fonte: Detalhamento elaborado pelo autor.

Do mesmo modo, a figura 28 traz o detalhamento do primeiro modelo para a barra de diâmetro 12,5mm.

Figura 28 - Primeiro modelo de variação para barra diâmetro 12,5mm - 5 ϕ . ϕ . 5 ϕ



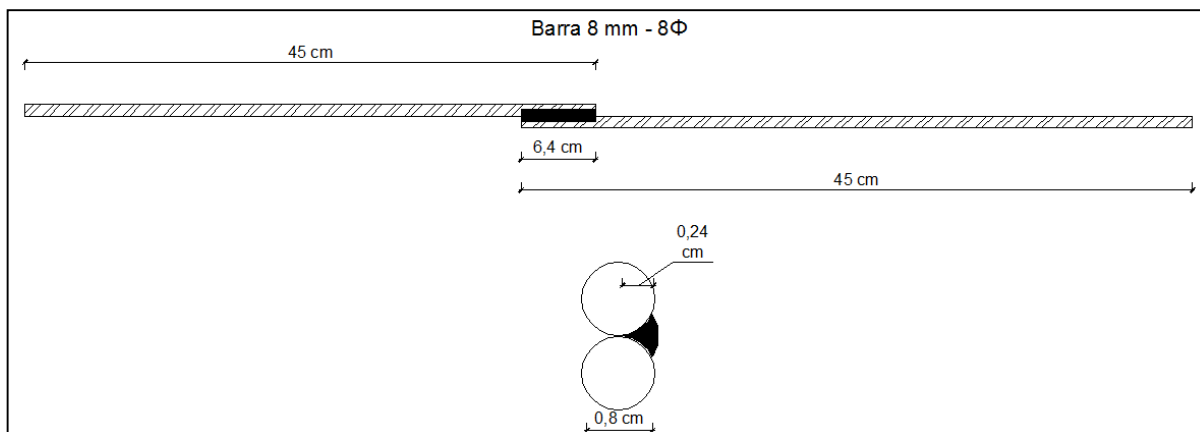
Fonte: Detalhamento elaborado pelo autor.

Após o ensaio de tração deste primeiro modelo, foi feita a análise dos resultados obtidos através de cálculos, os quais serão apresentados no item 3.4 - Cálculos para determinação dos modelos propostos números 02 e 03, na página 49, para determinar qual a área mínima necessária de solda poderia ser adotada, para que a emenda continuasse atendendo os requisitos de resistência definidos na

norma. Com os cálculos realizados, verificou-se que a emenda não necessitaria de espaçamento, e que poderia ser testada com o filete contendo o comprimento de apenas 08 vezes o diâmetro ad barra (8ϕ) e 07 vezes o diâmetro da barra (7ϕ).

Na figura 29, é apresentado o detalhamento do segundo modelo, com comprimento de filete com 8ϕ para barra de diâmetro 8mm.

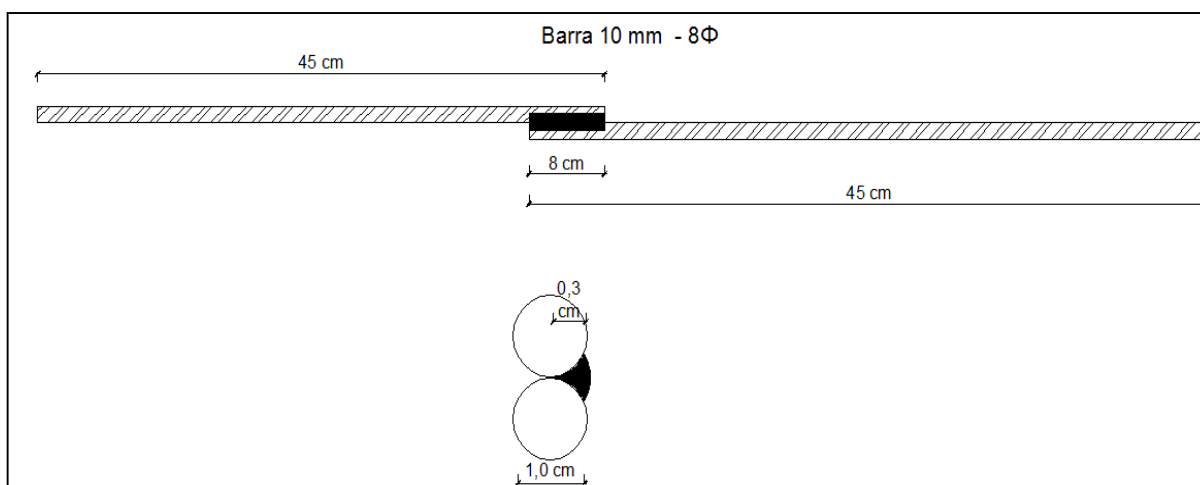
Figura 29 - Segundo modelo proposto para barra diâmetro 8mm, comprimento do filete de 8ϕ .



Fonte: Detalhamento elaborado pelo autor.

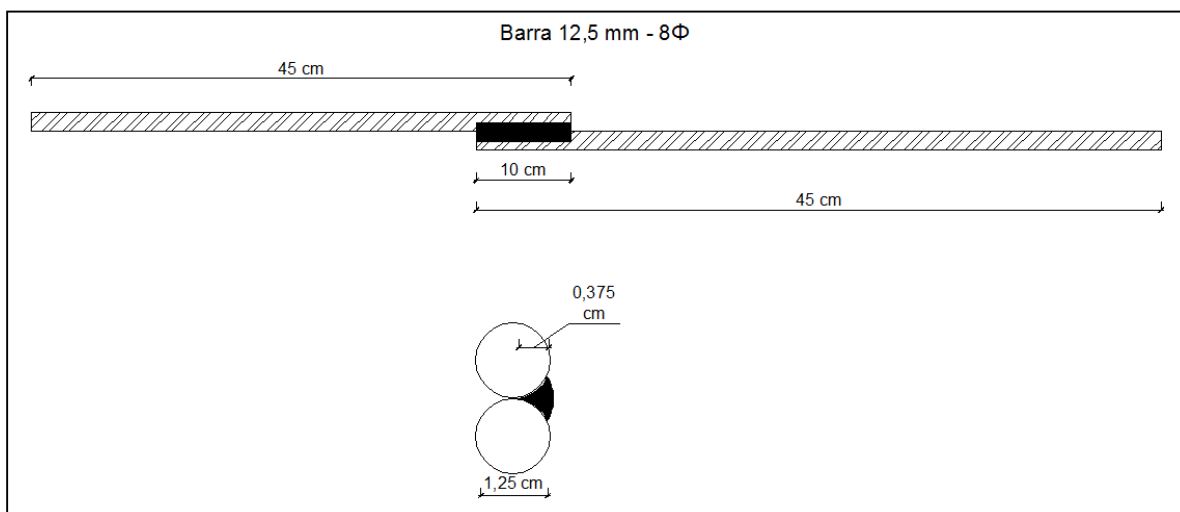
Na sequência, figuras 30 e 31, são apresentados os detalhamentos do segundo modelo com comprimento de filete com 8ϕ para as barras de diâmetro 10mm e 12,5mm.

Figura 30 - Segundo modelo proposto para barra diâmetro 10mm, comprimento do filete de 8ϕ



Fonte: Detalhamento elaborado pelo autor.

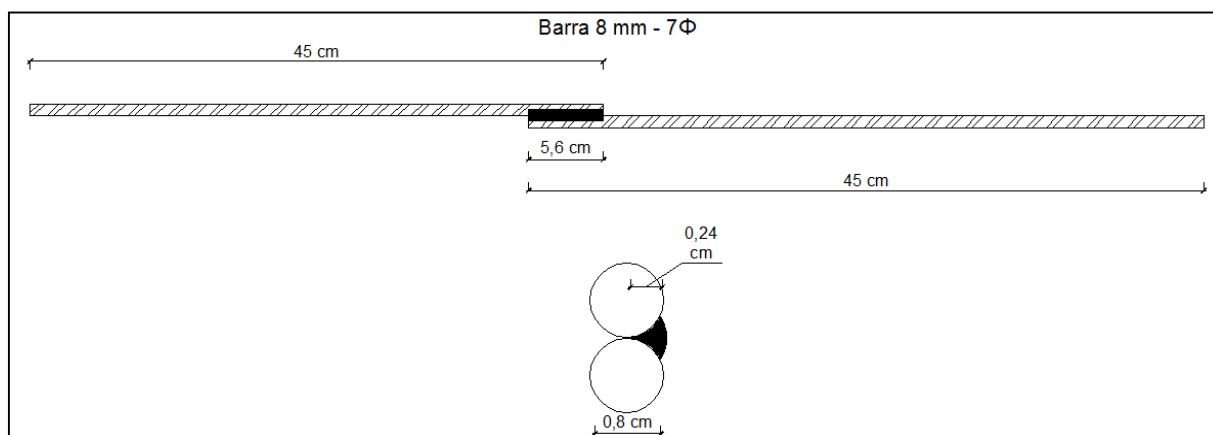
Figura 31-Segundo modelo proposto para barra diâmetro 12,5mm, comprimento do filete de 8 ϕ .



Fonte: Detalhamento elaborado pelo autor.

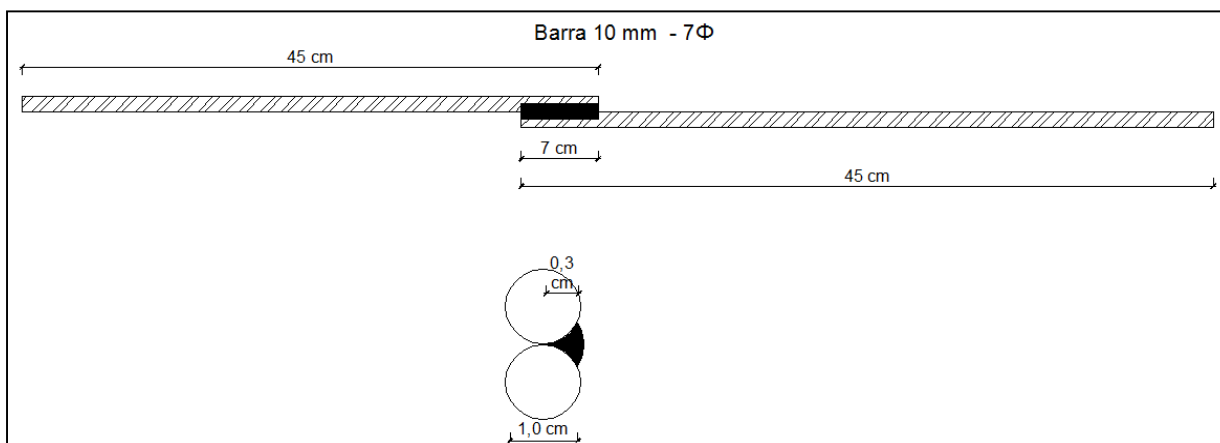
Os detalhamentos do terceiro modelo proposto, com 7 ϕ de comprimento do filete de solda estão apresentados nas figuras 32 a 34 abaixo.

Figura 32 - Terceiro modelo proposto para barra diâmetro 8mm, comprimento do filete de 7 ϕ .



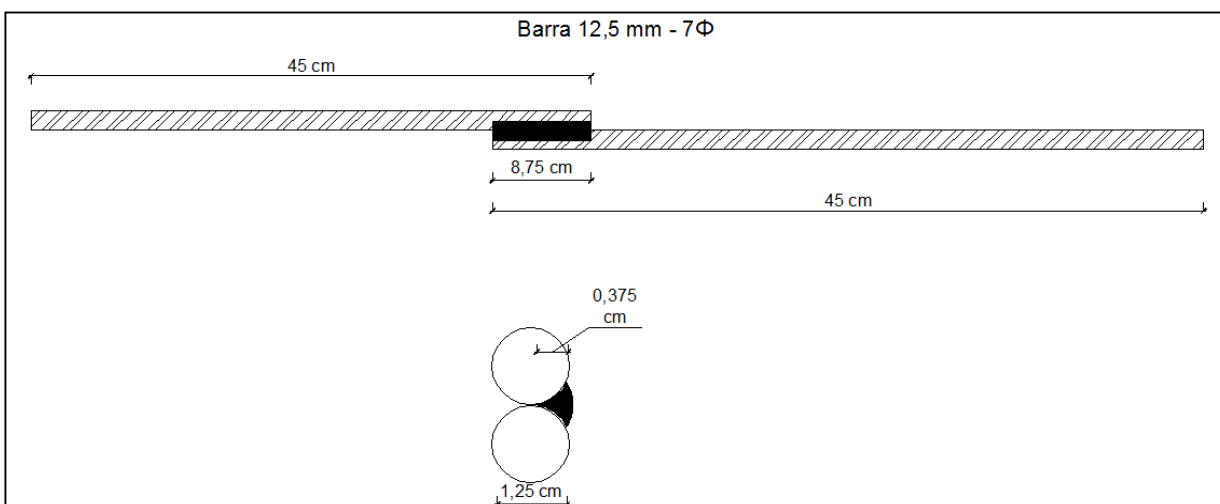
Fonte: Detalhamento elaborado pelo autor.

Figura 33 - Terceiro modelo proposto para barra diâmetro 10mm, comprimento do filete de 7 ϕ .



Fonte: Detalhamento elaborado pelo autor.

Figura 34-Terceiro modelo proposto para barra diâmetro 12,5mm, comprimento do filete de 7 ϕ .



Fonte: Detalhamento elaborado pelo autor.

3.3 Materiais utilizados

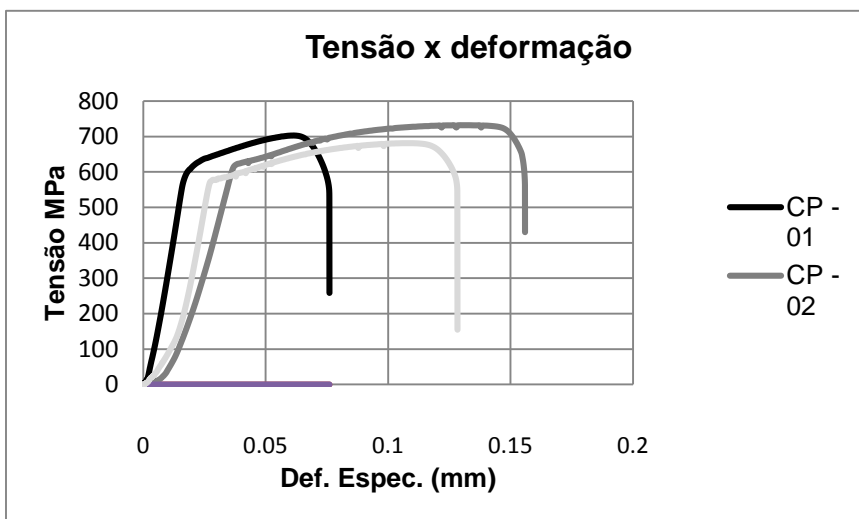
3.3.1 Aço

O aço foi adquirido de uma das maiores fabricantes do país. As barras são fornecidas com 12m de comprimento, e seus diâmetros variam de 5 a 40mm. Para realização deste estudo, serão usadas barras para concreto armado de denominação CA-50 com 8mm, 10mm e 12,5mm de diâmetro. Assim, foram adquiridas 02 barras de cada diâmetro, cada uma com 12m de comprimento.

Conforme a NBR 7480:2007, as barras CA-50 resistem a 500MPa (50KN/cm²) de força à tração, como já foi apresentado anteriormente na tabela 04 da página 39.

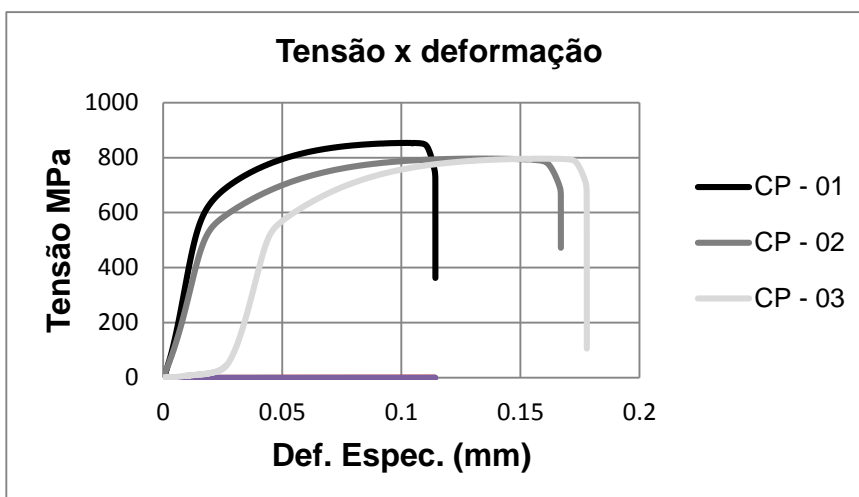
A seguir são apresentados os gráfico de tensão-deformação do aço, nas figuras 35 a 37, que foram obtidos através dos ensaios de tração das barras testemunho. Este gráfico será usado como parâmetro para comparação com os gráficos que serão obtidos nos ensaios de tração dos modelos propostos.

Figura 35 - Gráfico de tensão-deformação da barra diâmetro 8mm sem emenda.



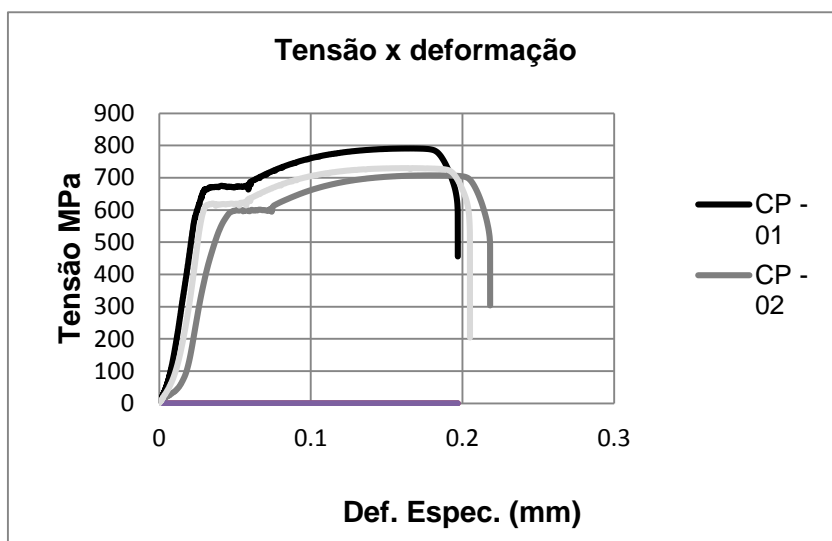
Fonte: Autor.

Figura 36 - Gráfico de tensão-deformação para barra diâmetro 10mm sem emenda.



Fonte: Autor.

Figura 37 - Gráfico de tensão-deformação para barra diâmetro 12,5mm sem emenda.

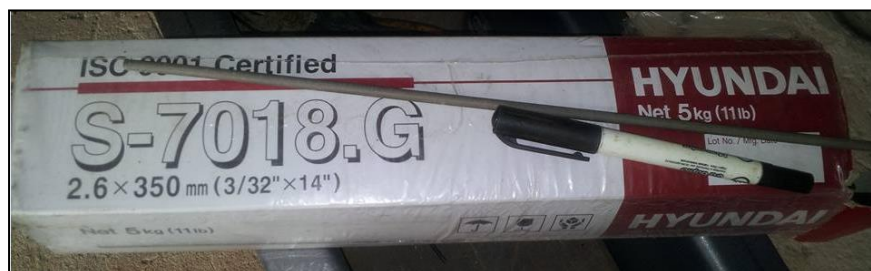


Fonte: Autor.

3.3.2 Eletrodo

O eletrodo usado para o processo de soldagem de arco elétrico com eletrodo revestido, foi o da marca Hyundai, com denominação S-7018.G com 2,6mm de diâmetro (figura 38). O revestimento que ele possui tem a função de proteger a solda durante o processo de fusão com o metal base. Deste modo, no momento da execução da solda, ele se transforma em gás que reveste a solda não permitindo que sujeiras entrem em contato com a solda, garantindo que a penetração adequada seja alcançada assim como a fusão dos materiais.

Figura 38 - Eletrodo utilizado nas emendas.



Fonte : Autor

A norma americana AWS D1.1, recomenda o uso do eletrodo 7018, pois é o mais indicado para a soldagem do aço CA-50, já que possui resistência à ruptura de 70 Ksi ou lbf/in² (libra por polegada ao quadrado) ou 485MPa, pois como já visto anteriormente na página 27, 01 ksi corresponde a 6,894757293178 MPa. Na tabela

05 estão apresentados os dados de resistências mínimas que o eletrodo alcança, a qual foi elaborada conforme dados retirados do site da Hyundai. Ainda segundo o fabricante, o eletrodo é indicado para soldagem de aços estruturais, vasos de pressão, construções navais, aços fundidos entre outros.

Tabela 05 - Resistência do eletrodo.

Resistência do eletrodo.		
Tensão de escoamento mínima (MPa- lbs/in ²)	Mínimo da Tensão máxima (MPa-lbs/in ²)	Alongamento mínimo (%)
504 (73.200)	572 (83.100)	29.8

Fonte : Tabela elaborada pelo autor conforme dados do site do fabricante.

3.4 Cálculos para determinação dos modelos propostos números 02 e 03.

Primeiro foi calculada qual a força máxima é exercida na emenda, através da equação 15, na qual é usado o valor da área da barra de aço vezes o fator de resistência do aço.

$$F = A_{\text{barra}} \cdot f_{yk} \quad (15)$$

Onde:

- A_{barra} - para barra de 8mm = 0,503 cm²
- para barra de 10mm = 0,785 cm²
- para barra de 12,5mm = 1,227 cm²

$$f_{y\text{kaço}} = 50\text{KN/cm}^2$$

Após o cálculo da força, é resolvida a equação 15, e comparados os valores com a equação 08, já apresentada na página 36. Para o resultado ser satisfatório, é necessário que $F < R_{\text{solda}}$.

$$R_d = A_w(0,60 f_w) / \gamma_{w2} \quad (08)$$

Adotar:

A_w = Área da solda dada por $0,3 \varnothing \cdot \ell$

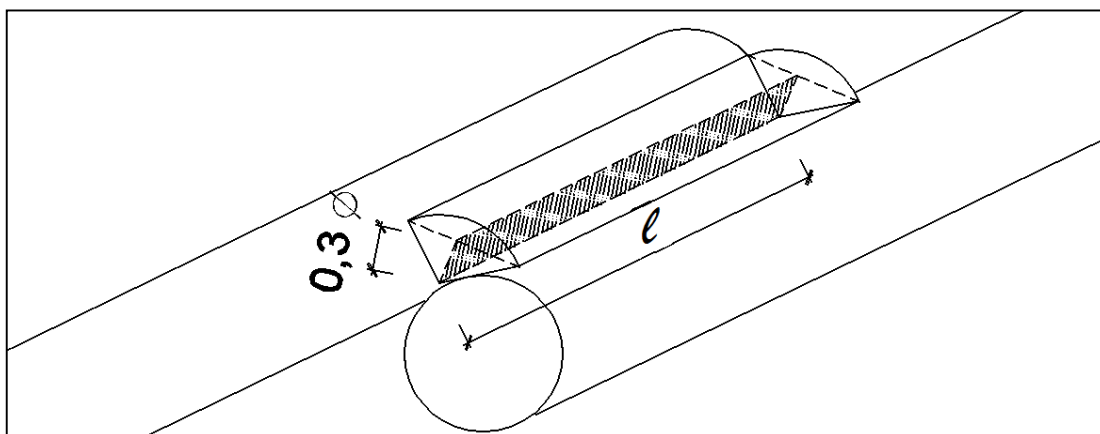
ℓ = comprimento do filete dado por \varnothing . (variação adotada)

f_w = tensão de escoamento da solda- para solda de 70 ksi o valor é 485MPa

$\gamma_{w2} = 1,35$ para combinações normais, especiais ou de construção.

A figura 39 mostra a área efetiva da solda usada para o cálculo acima.

Figura 39 - Área efetiva da solda.



Fonte : Autor

A tabela 06 mostra os resultados obtidos:

Tabela 06 - Resultados para Rd e força da barra.

	Força	Variação de 5\emptyset	Variação de 6\emptyset	Variação de 7\emptyset	Variação de 8\emptyset
Barra 8mm	25,15	25,86	31,04	36,21	41,38
Barra 10mm	39,25	32,33*	38,80*	45,27	51,73
Barra 12,5mm	61,35	40,42*	48,50*	56,58*	64,67

* Resultados não alcançam valor mínimo calculado.

Fonte: Autor.

Como é observado, somente os valores da variação 8 \emptyset atendem os valores da força calculada. Porém, como somente o valor da barra de diâmetro 12,5mm da variação de 7 \emptyset não atendeu o requisito, alcançando 92% da força, optou-se por realizar o ensaio com esta variação.

Assim, como mostrado nas figuras 29 a 34 nas páginas 44 a 46, foi adotado para o modelo 02 oito vezes o diâmetro (8 \emptyset) e para o modelo 03 sete vezes o diâmetro (7 \emptyset).

3.5 Procedimentos realizados

3.5.1 Execução das emendas com solda.

A execução da solda foi realizado por profissional especializado em solda, através do processo de soldagem denominado SMAW (*Shield Metal Arc Welding*), já mencionado anteriormente, onde a máquina produz uma corrente elétrica que é passada para o eletrodo. Na figura 40 abaixo, pode-se observar a máquina de solda utilizada da marca ESAB, específica para solda em arco elétrico com eletrodo revestido.

Figura 40 - Máquina de solda para processo do arco elétrico com arco revestido.



Fonte: Autor.

Para a execução das emendas com solda, optou-se em adotar barras com 45cm de comprimento cada, para melhor visualização dos resultados. Foram separados 6 pedaços de 45 cm de cada barra, com diâmetros de 8mm, 10mm e 12.5mm, totalizando 3 amostras de cada diâmetro. A voltagem utilizada para o eletrodo E-7018-G foi de 250 A.

Primeiro foi realizada a execução das emendas conforme detalhamento apresentados na figuras 23 a 25 das páginas 41 e 42. Logo após, a execução das emendas foram feitas conforme o primeiro modelo, cujos detalhamentos estão nas figuras 26 a 28 localizadas nas páginas 42 e 43.

Figura 41 - Barras diâmetro 8mm soldadas conforme a norma, e na sequência conforme primeiro modelo proposto.



Fonte: Autor.

Figura 42 - Barras diâmetro 10mm soldadas primeiro conforme a norma, e na sequência conforme primeiro modelo proposto.



Fonte: Autor.

Figura 43 - Barras diâmetro 12,5mm soldadas primeiro conforme a norma, e na sequência conforme primeiro modelo proposto.



Fonte: Autor.

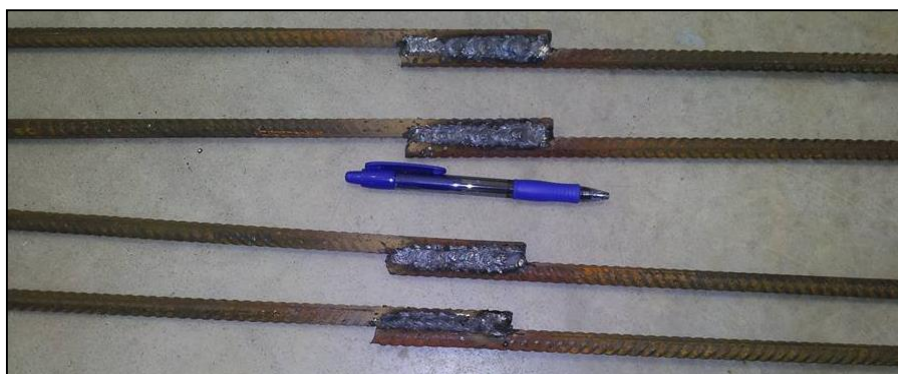
Nas figuras 44 a 46, estão as barras soldadas conforme os modelos 2 e 3, cujo detalhamentos estão apresentados nas figuras 29 a 34 das páginas 44 a 46.

Figura 44 - Barras diâmetro 8mm soldadas primeiro conforme modelo 02, e na sequência conforme modelo 03.



Fonte: Autor.

Figura 45 - Barras diâmetro 10mm soldadas primeiro conforme modelo 02, e na sequência conforme modelo 03.



Fonte: Autor.

Figura 46 - Barras diâmetro 12,5mm soldadas primeiro conforme modelo 02, e na sequência conforme modelo 03.



Fonte: Autor.

3.5.2 Realização do ensaio de tração.

O ensaio de tração foi realizado no laboratório de engenharia civil da Universidade de Santa Cruz - UNISC. Para o ensaio foi utilizada a máquina universal para ensaios mecânicos de tração com capacidade de carga de 300KN, modelo DL 30000N EMIC 23-300, marca INSTRON/EMIC, com célula Trd 29, como mostra a figura 47. O software utilizado juntamente com a máquina é o Tesc versão 3.04.

O equipamento fornece o diagrama de tensão-deformação da barra, além dos dados de força aplicada na barra, comprimento do alongamento total da barra, valores da tensão de escoamento e tensão máxima suportadas pela barra.

Figura 47 - Realização de ensaio de tração em uma ligação soldada.



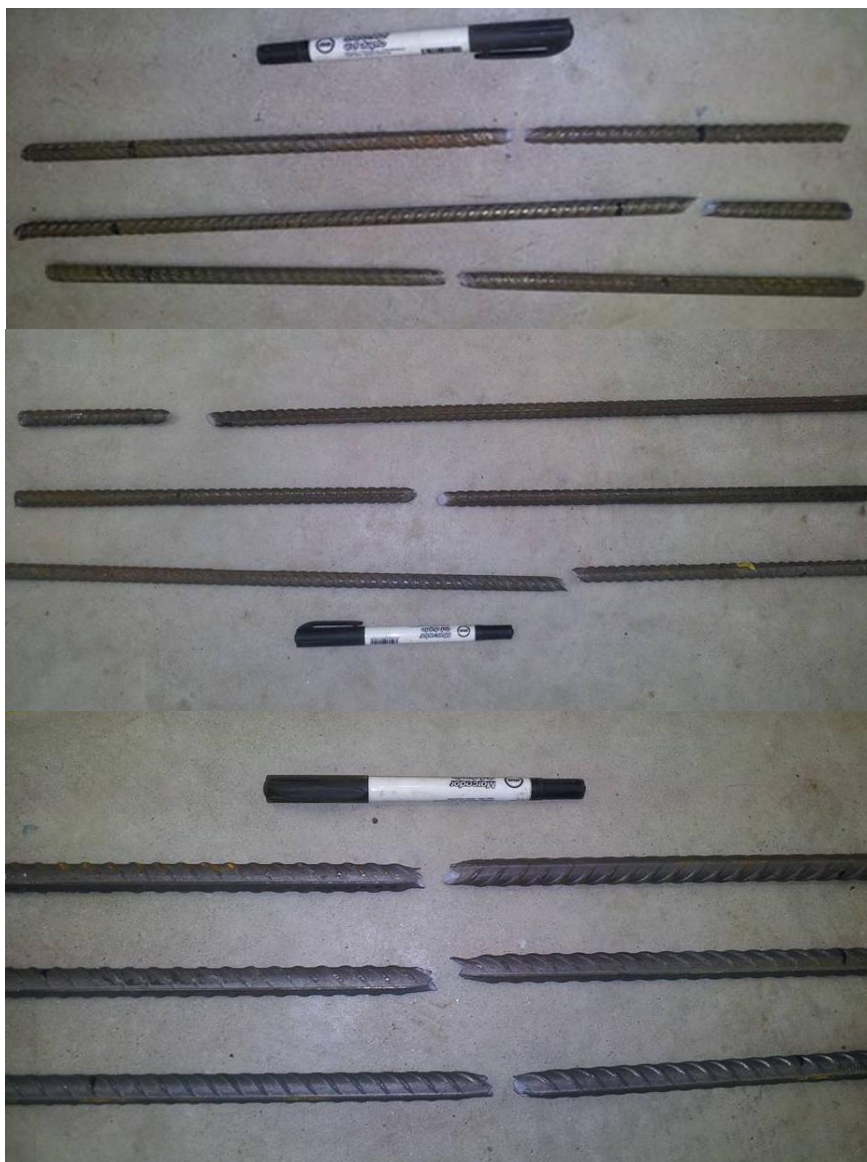
Fonte: Autor.

O ensaio de tração possibilita verificar se as especificações do fabricante sobre a tensão resistida pelo aço está em conformidade com as normas vigentes.

Para o ensaio, só é necessário posicionar a amostra no local indicado, onde existem garras que irão garantir que a amostra não saia do lugar. Após configurar a máquina, esta começa a exercer uma força de tração na barra que aumenta gradualmente, até que inicie a estrição (diminuição da seção da área da barra), e logo após ocorre a ruptura da amostra.

Inicialmente o ensaio de tração foi realizado nas barras sem emenda para verificar se as mesmas satisfazem as recomendações da NBR 7480:2007. Abaixo, na figura 48, observa-se a ruptura das barras de diâmetros 8mm, 10mm e 12.5mm que passaram pelo ensaio, os resultados dos valores obtidos serão apresentados no capítulo 4 - Resultados e análises na página 59.

Figura 48 - Barras diâmetros 8, 10 e 12.5mm após ensaio de tração.



Fonte: Autor.

Na sequência, foi realizado o ensaio de tração nas barras emendadas conforme a norma, e logo após nas barras do primeiro protótipo proposto.

As figuras 49 a 51 mostram as barras após o ensaio, com a seguinte sequência: barras emendadas conforme a norma e barras emendadas conforme primeiro modelo proposto.

Figura 49 - Emendas conforme a norma e conforme modelo 01 para barras diâmetro 8mm



Fonte: Autor.

Figura 50 - Emendas conforme a norma e conforme modelo 01 para barras diâmetro 10mm



Fonte: Autor.

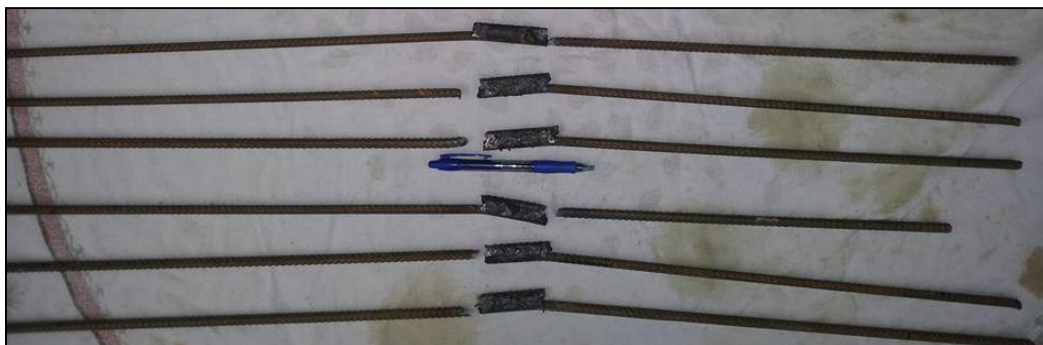
Figura 51 - Emendas conforme a norma e conforme modelo 01 para barras diâmetro 12,5mm



Fonte: Autor.

Nas figuras 52 a 54 observa-se as barras já rompidas no ensaio de tração. De cima para baixo estão as barras emendadas conforme modelo 02 e após as emendadas com o modelo 03.

Figura 52 - Barras diâmetro 8mm emendadas conforme modelo 02 e modelo 03.



Fonte: Autor.

Figura 53 - Barras diâmetro 10mm emendadas conforme modelo 02 e modelo 03.



Fonte: Autor.

Figura 54 - Barras diâmetro 12,5mm emendadas conforme modelo 02 e modelo 03.



Fonte: Autor.

Nas barras de diâmetro 10mm e 12,5mm, observa-se que os primeiros corpos de prova do modelo 03 romperam na solda, porém isto não afetou os resultados de tensão mínima e máxima, ambas atingiram os valores requisitados na norma conforme é apresentado no capítulo 4 - resultados e análises na página 59.

Verificou-se durante os ensaios de tração que os modelos propostos apresentam uma rotação em relação ao eixo da solda, como pode ser observado nas figuras 49 a 54. Os modelos propostos 02 e 03 apresentam essa rotação mais acentuada que o modelo 01.

Devido essa rotação dar-se antes do aço atingir a tensão de ruptura, em algumas situações isso pode levar à fissuração e ruptura antecipada do concreto. Porém essa rotação pode ser resolvida fazendo-se uma correção inicial do ângulo da emenda. Para a correção deste ângulo, basta fazer uma pequena dobra na ponta da parte que será emendada, calculado através dos conhecimentos adquiridos na resistência dos materiais. Deste modo quando aplicada a força de tração, esta pequena dobra exercerá força contra a outra barra, evitando assim a rotação no eixo.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1.1 Resultados para barra diâmetro 8 mm.

Os resultados de cada ensaio são analisados por diâmetro das barras, tendo como parâmetro os ensaios das barras sem emenda.

É analisado primeiramente os resultados obtidos no ensaio de tração das barras de diâmetro 8mm. Como mencionado antes, foram ensaiadas 3 amostras de cada diâmetro com 45 cm de comprimento cada. Foi calculada a média das tensões somando o resultado das amostras ensaiadas e dividindo o valor total pela quantidade de amostras ensaiadas.

Na tabela 07 estão os resultados da barra testemunho (sem emenda) e da barra com emenda conforme as normas NBR 6118:2014 e NBR 14931:2007. Observa-se que a barra testemunho atinge os valores requisitados na norma, mostrados na tabela 04, página 39. A emenda conforme a norma também atinge os valores mínimos exigidos na norma, e mostra uma pequena variação para menos em relação à barra testemunho, mas nada que comprometa a resistência exigida da barra. Os valores de tensão de ruptura obtidos estão bem acima do requisitado pela norma, que exige $1,08f_y$ ($1,08 \cdot 500 = 540\text{MPa}$).

Todos os modelos propostos tiveram comportamento igual ao da barra testemunho, sofrendo o alongamento, a estricção e depois a ruptura, todos dentro dos valores necessários.

Tabela 07 - Resultados do ensaio de tração barra diâmetro 8mm.

Barra testemunho diâmetro 8mm						
Barra	Tensão exigida na norma MPa	Amostra	Tensão de escoamento MPa	Média dos resultados Tensão MPa	Tensão de máxima MPa	Média dos resultados Tensão MPa
CA-50 diâmetro 8mm	500	1	623.16	602.97	731.65	705.32
		2	577.89		681.46	
		3	607.87		702.85	
Barra diâmetro 8mm com emenda da norma - $\geq 5\phi$. $\geq 5\phi$. $\geq 5\phi$.						
CA-50 diâmetro 8mm	500	1	583,92	585,36	673,03	671,59
		2	589,27		688,87	
		3	582,89		652,87	

Fonte: Tabela elaborada pelo autor.

A tabela 08 mostra os valores obtidos no ensaio de tração dos modelos 01, 02 e 03 propostos. Novamente observa-se uma pequena variação para menos dos valores em relação à barra testemunho, porém os valores atingem os mínimos exigidos nas normas.

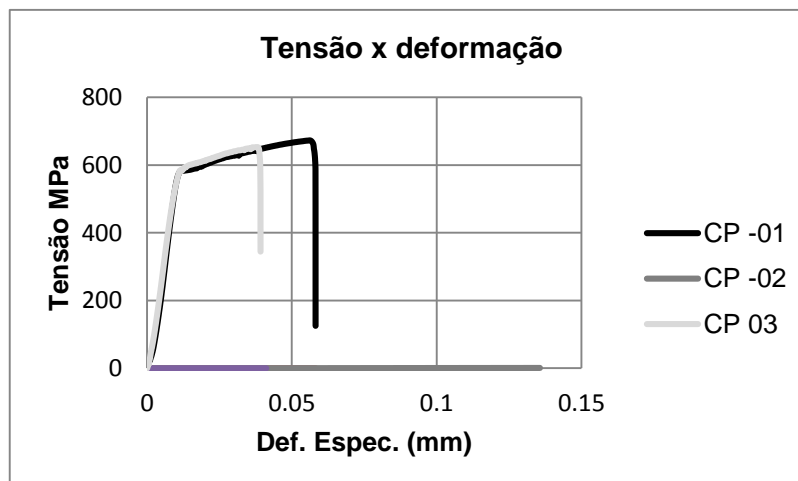
Tabela 08 - Resultados do ensaio de tração barra diâmetro 8mm.

Barra diâmetro 8mm com emenda do primeiro modelo proposto- 5ϕ. ϕ. 5ϕ.						
Barra	Tensão exigida na norma MPa	Amostra	Tensão de escoamento MPa	Média dos resultados Tensão MPa	Tensão de máxima MPa	Média dos resultados Tensão MPa
CA-50 diâmetro 8mm	500	1	571,38	580,67	670,97	677,07
		2	589,11		685,99	
		3	581,51		674,26	
Barra diâmetro 8mm com emenda do segundo modelo proposto - 8ϕ.						
CA-50 diâmetro 8mm	500	1	598,16	592,76	622,22	606,38
		2	592,23		600,42	
		3	587,89		596,51	
Barra diâmetro 8mm com emenda do terceiro modelo proposto - 7ϕ.						
CA-50 diâmetro 8mm	500	1	592,97	591,23	629,22	628,46
		2	595,01		637,65	
		3	585,72		618,52	

Fonte: Tabela elaborada pelo autor.

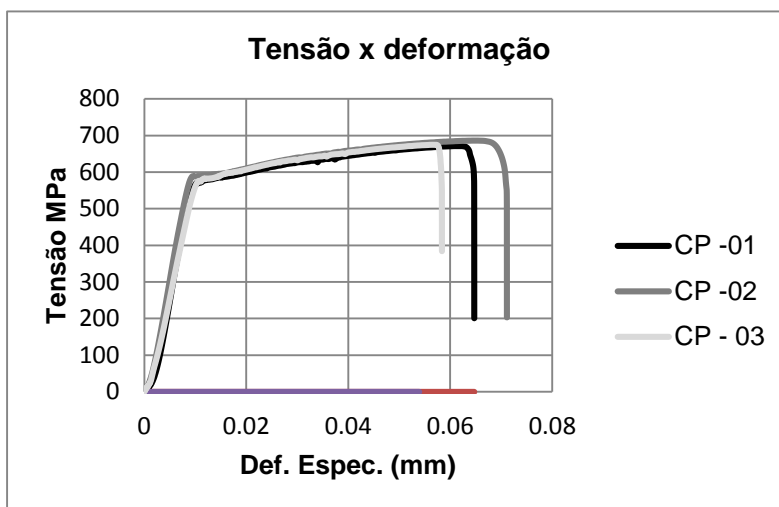
Abaixo estão apresentados os gráficos tensão x deformação. Como pode ser observado nos gráficos, a curva tensão x deformação segue o padrão de curva do gráfico da barra testemunho, deste modo os resultados dos modelos são satisfatórios.

Figura 55 - Gráfico tensão x deformação barra diâmetro 8mm conforme a norma.



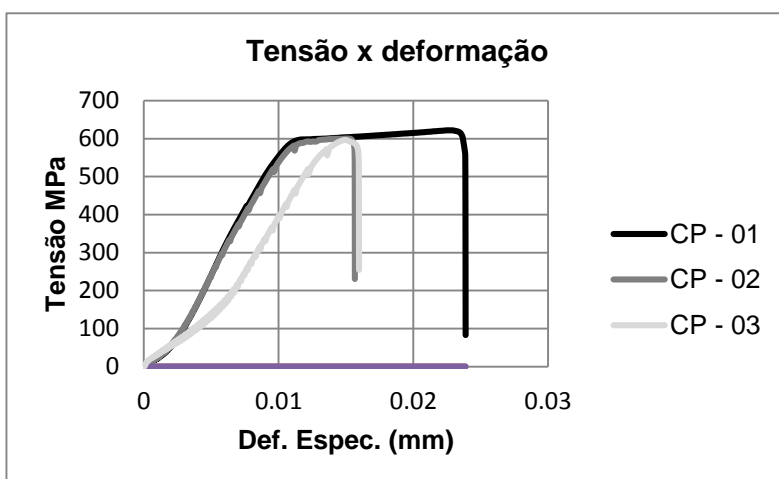
Fonte: Autor

Figura 56 - Gráfico tensão x deformação barra diâmetro 8mm conforme o primeiro modelo.



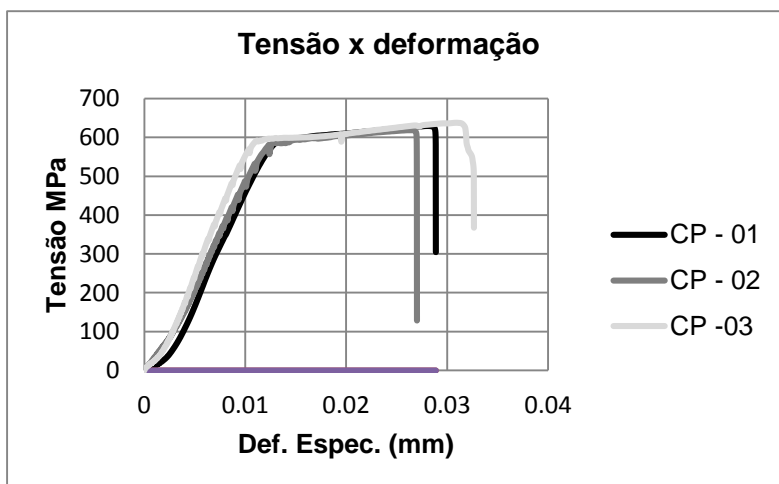
Fonte: Autor.

Figura 57 - Gráfico tensão x deformação barra diâmetro 8mm conforme o segundo modelo.



Fonte: Autor.

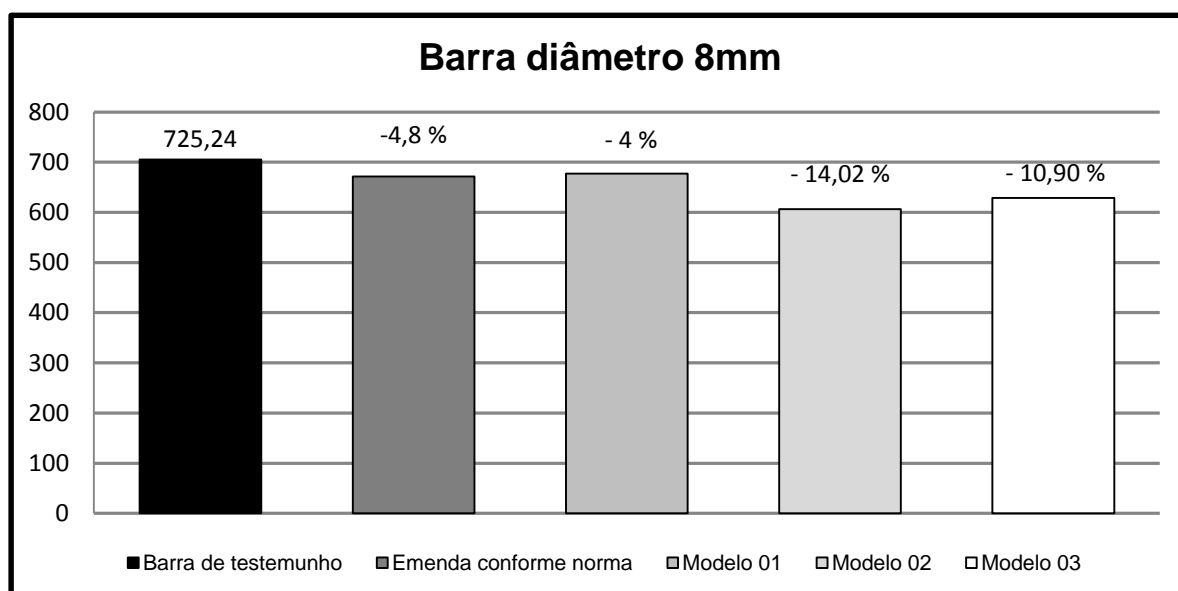
Figura 58 - Gráfico tensão x deformação barra diâmetro 8mm conforme o terceiro modelo.



Fonte: Autor.

Na figura 59 estão relacionados os valores dos modelos com o valor da tensão de ruptura da barra testemunho. Tendo a barra testemunho alcançado valor de tensão de ruptura de 705,32 MPa, observa-se que a emenda segundo a norma obteve valor abaixo da barra testemunho, queda que corresponde a 4,8%. O modelo 01 proposto também obteve queda no valor da resistência de ruptura, com queda de 4%, queda menor se comparado com a emenda da norma. Os modelos 02 e 03 propostos foram os que mais obtiveram queda, com 14,02% e 10,90% respectivamente. Porém, esta porcentagem de queda não é significativa, pois ainda que todos os resultados tenham sofrido queda de resistência em comparação à barra testemunho, encontram-se acima do valor de resistência à ruptura exigida na norma que é de 540 MPa.

Figura 59 - Variação dos resultados em relação à barra testemunho.



Fonte: Autor.

4.1.2 Resultados para barra diâmetro 10 mm.

Para a barra de diâmetro 10mm, a tabela 09 apresenta os resultados da barra testemunho e da barra com emenda conforme as normas. Os valores obtidos no ensaio de tração para a barra sem emenda e para a barra emendada conforme a norma estão acima dos valores requisitados na norma.

Nota-se que diferentemente da barra diâmetro 8mm, os valores de tensões da barra emendada conforma a norma mostraram-se superiores da barra testemunho.

Tabela 09 - Resultados do ensaio de tração da barra diâmetro 10mm.

Barra testemunho diâmetro 10mm						
Barra	Tensão exigida na norma MPa	Amostra	Tensão de escoamento MPa	Média dos resultados Tensão MPa	Tensão de máxima MPa	Média dos resultados Tensão MPa
CA-50 diâmetro 10mm	500	1	592.9	556.97	853.45	815.40
		2	535.49		796.18	
		3	542.52		796.58	
Barra diâmetro 10mm com emenda da norma - $\geq 5\phi$. $\geq 5\phi$. $\geq 5\phi$.						
CA-50 diâmetro 10mm	500	1	615,09	611,79	858,19	854,41
		2	607,58		851,08	
		3	612,7		853,97	

Fonte: Tabela elaborada pelo autor.

Do mesmo modo, na tabela 10, o primeiro modelo proposto apresenta valores de tensões superiores da barra testemunho a emenda do primeiro modelo proposto, porém um pouco abaixo da emenda da norma, mas mesmo assim bem acima dos valores de tensões que a norma exige. Os modelos 02 e 03 obtiveram valores de tensão um pouco inferiores em relação à barra testemunho, mas alcançaram os exigidos na norma.

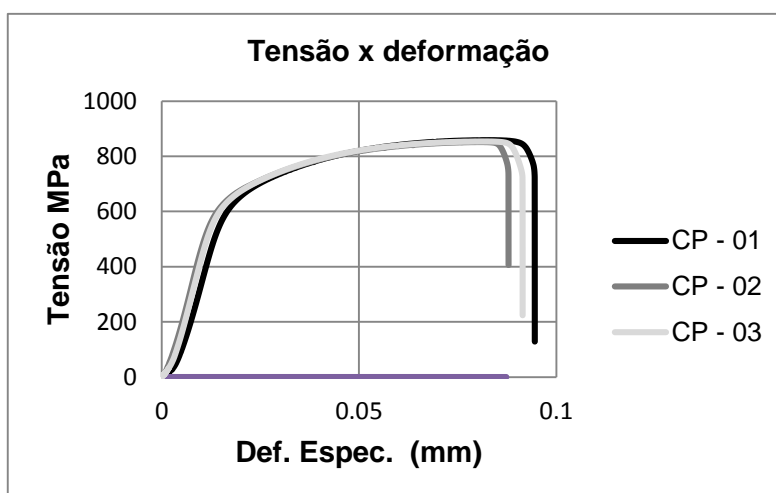
Tabela 10 - Resultados do ensaio de tração da barra diâmetro 10mm.

Barra diâmetro 10mm com emenda do primeiro modelo - 5ϕ . ϕ . 5ϕ .						
Barra	Tensão exigida na norma MPa	Amostra	Tensão de escoamento MPa	Média dos resultados Tensão MPa	Tensão de máxima MPa	Média dos resultados Tensão MPa
CA-50 diâmetro 10mm	500	1	607,09	599,27	854,63	852,61
		2	600,25		854,11	
		3	590,46		849,1	
Barra diâmetro 10mm com emenda do segundo modelo 8ϕ .						
CA-50 diâmetro 10mm	500	1	546,1	546,38	795,79	788,06
		2	543,75		775,51	
		3	549,30		792,89	
Barra diâmetro 10mm com emenda do terceiro modelo 7ϕ .						
CA-50 diâmetro 10mm	500	1	535,05	538,32	699,29	746,46
		2	550,09		774,99	
		3	529,81		765,11	

Fonte: Tabela elaborada pelo autor.

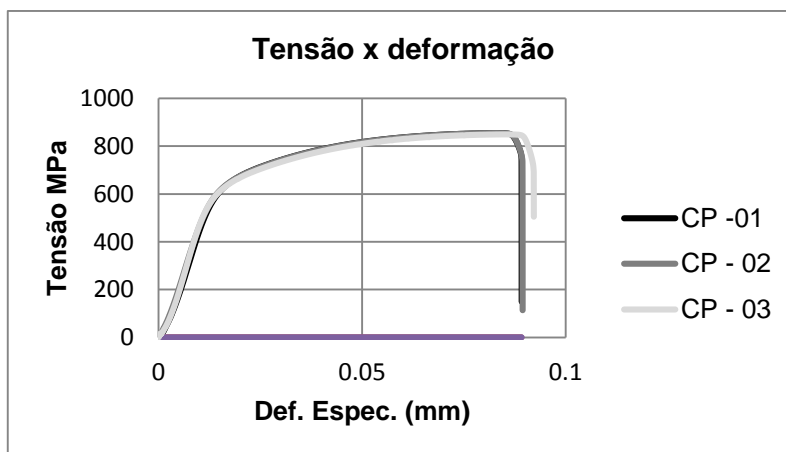
Abaixo, nas figuras 60 a 63 os resultados dos gráficos tensão x deformação obtidos no ensaio de tração. A curva apresenta o comportamento esperado, mostrando-se com pequenas variações em comparação ao gráfico da barra testemunho visualizado na figura 36 da página 46.

Figura 60 - Gráfico tensão x deformação barra diâmetro 10mm emendada conforme norma.



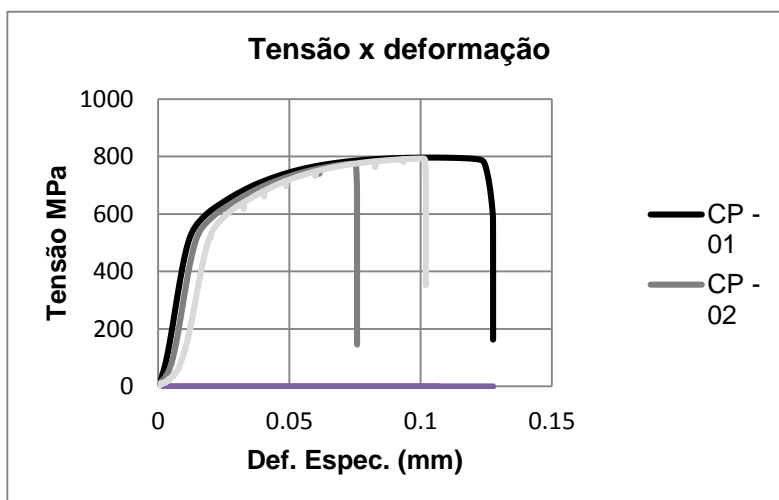
Fonte: Autor.

Figura 61 - Gráfico tensão x deformação barra diâmetro 10mm conforme o primeiro modelo.



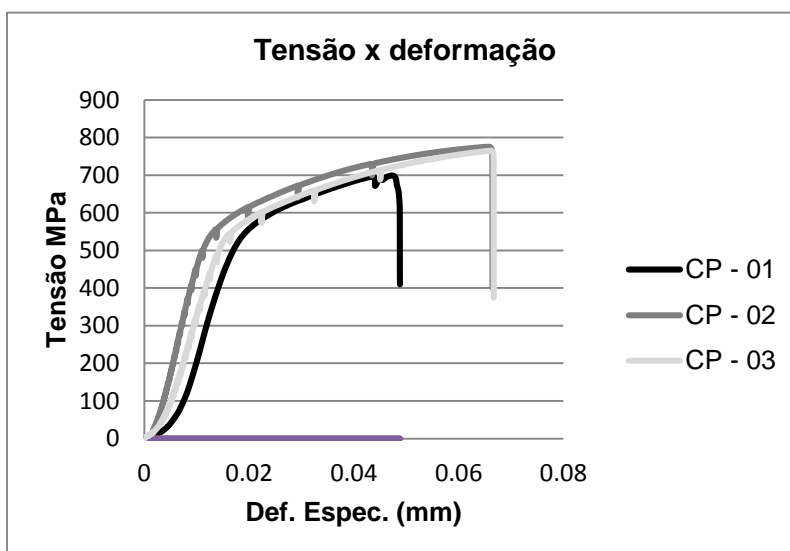
Fonte: Autor.

Figura 62 - Gráfico tensão x deformação barra diâmetro 10mm conforme o segundo modelo.



Fonte: Autor.

Figura 63 - Gráfico tensão x deformação barra diâmetro 10mm conforme o terceiro modelo.

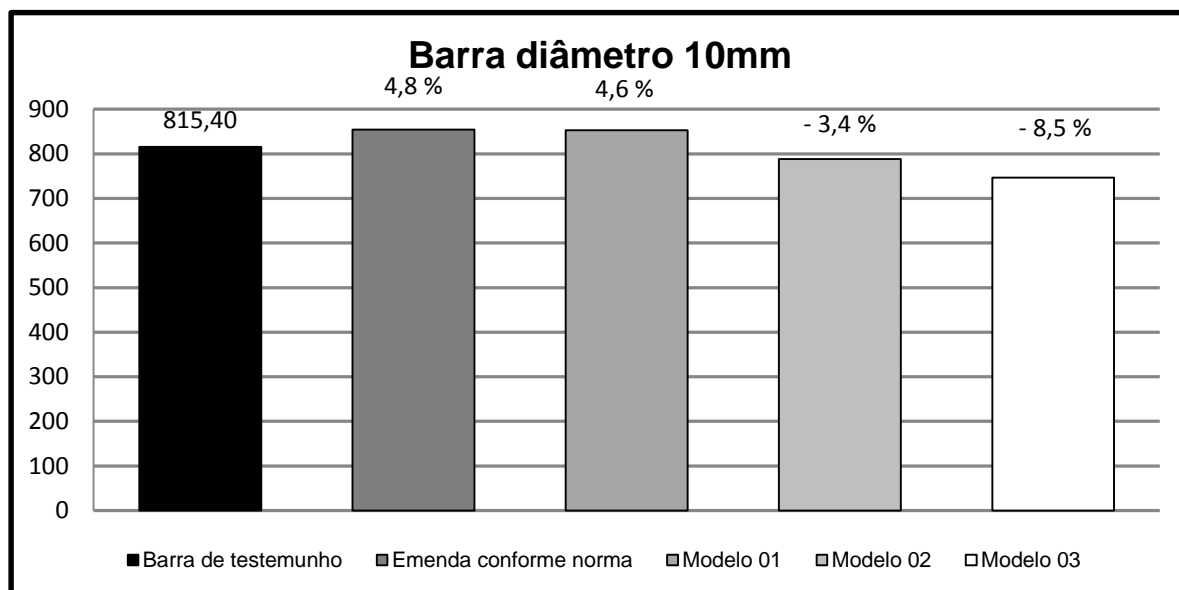


Fonte: Autor.

A figura 64 apresenta a porcentagem de variação da resistência à ruptura dos modelos em comparação à barra testemunho. A emenda segundo a norma e o modelo 01 proposto tiveram um aumento de 4,8% e 4,6% respectivamente no valor obtido para tensão de ruptura em comparação aos 815,40 MPa e tensão de ruptura da barra testemunho.

Os modelos 02 e 03 propostos, obtiveram 3,40% e 8,50% de queda em comparação ao valor da barra testemunho. Mesmo tendo os modelos 02 e 03 obtido valores menores ao da barra testemunho, ainda encontra-se bem acima do valor mínimo pedido em norma, assim os resultados de todos os modelos são satisfatórios.

Figura 64 - Variação dos resultados em relação à barra testemunho.



Fonte: Autor.

4.1.3 Resultados para barra 12,5 mm.

Na comparação de resultados da barra de diâmetro 12,5mm, observa-se que no segundo corpo de prova da barra testemunho, o valor obtido não atinge o critério de tensão mínima de escoamento de 500MPa pedido nas normas, desta maneira a amostra foi descartada, e a média dos resultados foram calculados somando apenas os valores do primeiro e terceiro corpo de prova e dividindo este valor por 2. Todos os outros corpos de prova dos modelos atingiram os valores mínimos de tensões.

A barra com emenda conforme a norma apresenta, conforme a tabela 11, tensão de escoamento maior que a barra testemunho, em contrapartida o valor de tensão de ruptura encontra-se um pouco inferior, mas essas discrepâncias não tem maior significado.

Na tabela 12, para os modelos 01 e 02 novamente a tensão de escoamento apresenta-se superior da barra testemunho, porém a tensão de ruptura está um pouco abaixo da apresentada na barra sem emenda. Já no modelo 03, ambas as tensões estão abaixo das obtidas na barra testemunho. Apesar das variações, todos os modelos propostos atingem as tensões das normas.

Tabela 11 - Resultados do ensaio de tração da barra diâmetro 12,5mm.

Barra testemunho diâmetro 12,5mm						
Barra	Tensão exigida na norma MPa	Amostra	Tensão de escoamento MPa	Média dos resultados Tensão MPa	Tensão de máxima MPa	Média dos resultados Tensão MPa
CA-50 diâmetro 12,5mm	500	1	563,76	587,08	720,27	725,24
		2	464,59*		707,38	
		3	610,4		730,21	
Barra diâmetro 12,5mm com emenda da norma - $\geq 5\phi$. $\geq 5\phi$. $\geq 5\phi$.						
CA-50 diâmetro 12,5mm	500	1	583,91	597,10	721,7	720,61
		2	603,44		719,85	
		3	603,94		720,27	

* Valor não atingiu mínimo de 500MPa exigido na NBR 7480:2007

Fonte: Tabela elaborada pelo autor

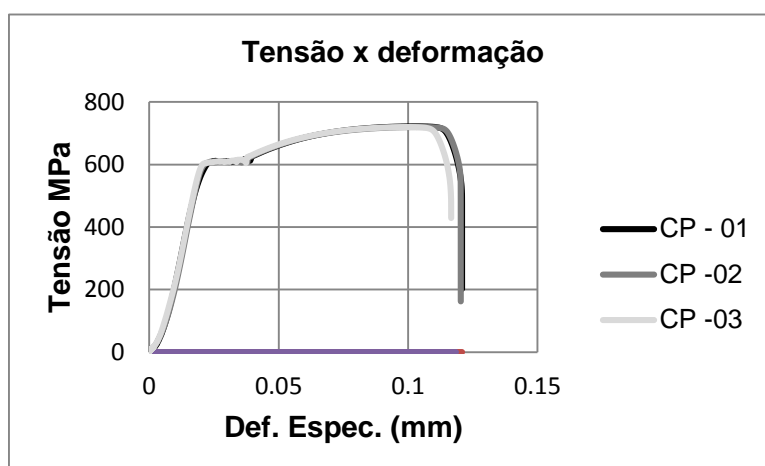
Tabela 12 - Resultados do ensaio de tração da barra diâmetro 12,5mm.

Barra 12,5mm com emenda do primeiro modelo - 5ϕ . ϕ . 5ϕ .						
Barra	Tensão exigida na norma MPa	Amostra	Tensão de escoamento MPa	Média dos resultados Tensão MPa	Tensão de máxima MPa	Média dos resultados Tensão MPa
CA-50 12,5mm	500	1	597,15	595,53	721,03	720,89
		2	601,96		723,05	
		3	587,48		718,59	
Barra 12,5mm com emenda do segundo modelo 8ϕ .						
CA-50 12,5mm	500	1	596,92	600,54	690,95	701,60
		2	602,79		704,77	
		3	601,91		709,07	
Barra 12,5mm com emenda do terceiro modelo 7ϕ .						
CA-50 12,5mm	500	1	603,65	580,46	694,83	678,54
		2	570,45		666,52	
		3	567,28		674,27	

Fonte: Tabela elaborada pelo autor

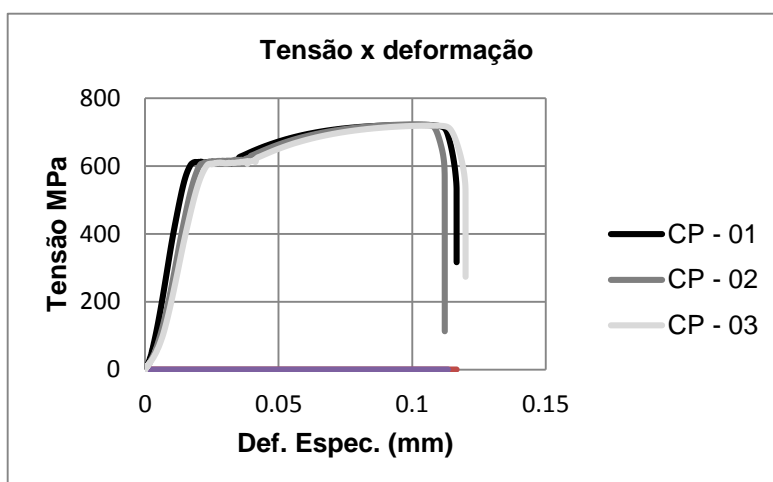
Nas figuras 65 a 68 estão os gráficos de tensão x deformação obtidos. Novamente, a curva de tensão x deformação segue o padrão de curva para o aço, mostrando que os modelos propostos são aceitáveis.

Figura 65 - Gráfico tensão x deformação barra 12,5mm emenda conforme norma.



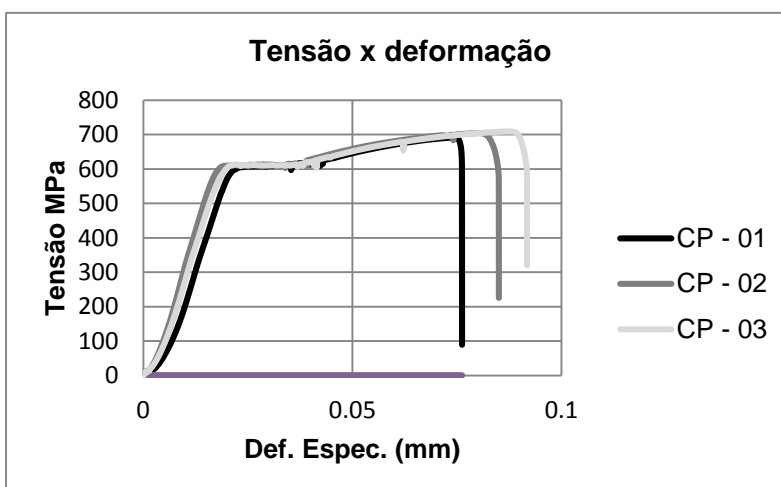
Fonte: Autor.

Figura 66 - Gráfico tensão x deformação barra 12,5mm emenda conforme primeiro modelo.



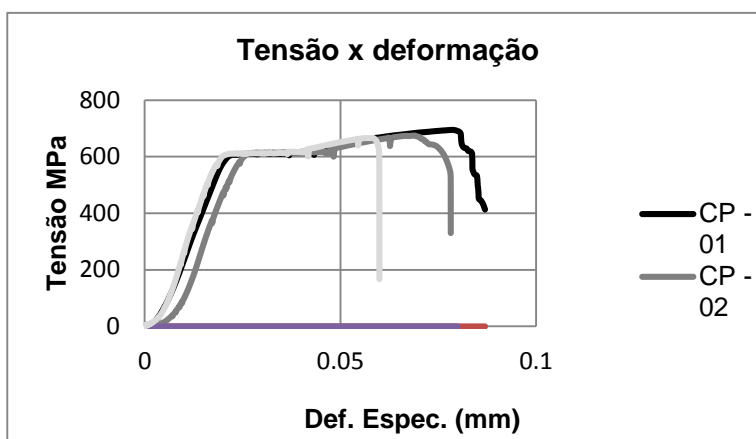
Fonte: Autor.

Figura 67 - Gráfico tensão x deformação barra 12,5mm emenda conforme segundo modelo.



Fonte: Autor.

Figura 68 - Gráfico tensão x deformação barra 12,5mm emenda conforme terceiro modelo.

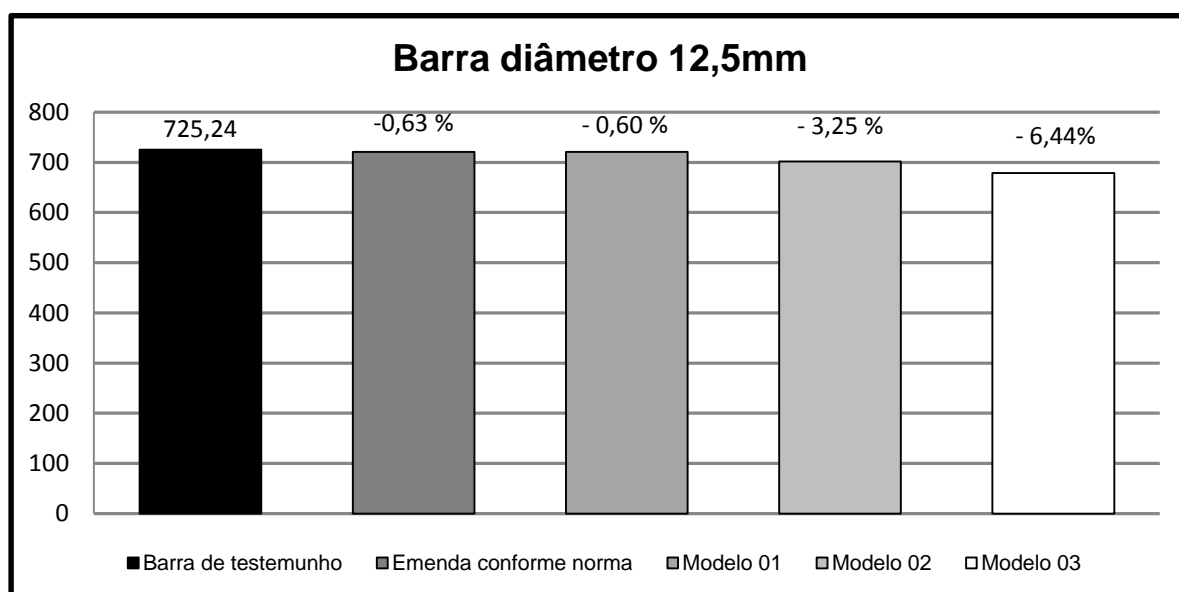


Fonte: Autor.

Na figura 69 é apresentado o gráfico de comparação dos resultados de tensão de ruptura para análise da barra de diâmetro 12,5mm.

Para a emenda segundo a norma, a diferença em relação à barra testemunho foi de menos 0,63%, e para o modelo 01 proposto esta diferença foi de menos 0,60%. Os modelos 02 e 03 obtiveram maiores diferenças em relação ao valor de tensão de ruptura de 725,24 MPa da barra testemunho, estes valores foram de menos 3,25% para o modelo 02 e menos 6,44% para o modelo 03, mesmo assim continuam dentro dos valores mínimos exigidos nas normas. Como já mencionado antes, do mesmo modo, mesmo o modelo 03 ser o que sofreu maior queda de tensão comparado com a barra testemunho, ainda assim está dentro dos valores pedidos na norma.

Figura 69 - Variação dos resultados em relação à barra testemunho.



Fonte: Autor.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

A realização deste trabalho foi de extrema importância para minha formação acadêmica, pois meus conhecimentos foram enriquecidos através da análise teórica e experimentalmente.

O principal objetivo deste trabalho foi verificar quais variações seriam possíveis realizar na emenda executada por solda com traspasse, afim de simplificar a resolução de problemas encontrados nas obras. Pois, em alguns casos como reparo de arranques, reforços da estrutura ou recuperação de patologias, a barra pode encontrar-se com comprimento inferior ao descrito na norma, tornando a emenda impossível de ser executada

Assim, com base nos estudos e testes realizados foi possível chegar as seguintes conclusões:

- a) Na comparação dos resultados teóricos com os experimentais, observa-se que em todos os resultados obtidos através dos ensaios de tração os modelos obtiveram valores de tensão acima dos descritos nas normas, com isso conclui-se que há margem para propor a redução da emenda com solda.
- b) Os resultados calculados para os modelos 02 e 03 mostraram-se compatíveis com os resultados obtidos no ensaio de tração, concluindo-se que é possível resolver problemas utilizando os cálculos propostos nas normas, e aliar o cálculo com o ensaio de tração somente nos casos que necessitem de maiores referências.
- c) Conforme os resultados obtidos no ensaio de tração, os modelos propostos são considerados aceitáveis pois alcançaram os valores mínimos exigidos nas normas. Desta forma, conclui-se que os modelos podem ser utilizados para realizar emendas de barras em situações que outras emendas não possam ser executadas.
- d) Assim, os modelos 01, 02 e 03 possui comprimento de emenda inferior ao da norma, podendo estes serem propostos como novos modelos para a NBR 6118:2014, pois podem resolver imprevistos que ocorram na obra além de simplificar o método de emenda com solda.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros.

- a) Ensaiar ligações soldadas por traspasse em elementos estruturais como vigas, pilares.
- b) Ensaiar ligações soldadas com barras justapostas para tentar achar variações no comprimento do filete de solda.
- c) Ensaiar ligações soldadas com eletrodo 60ksi.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6118 (2014) . Projeto de Estrutura de Concreto - Procedimento. Rio de Janeiro

_____. NBR 8800 (2008) . Projeto de Estrutura de Aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro

_____. NBR 7480 (2007) . Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado. Rio de Janeiro

_____. NBR 8548 (1984) .Barras de aço destinadas a armaduras para concreto armado com emenda mecânica ou por solda - Determinação da resistência à tração - Método de ensaio. Rio de Janeiro.

_____. NBR 14931 (2004) .Execução de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro.

_____. NBR 8965 (1985) .Barras de aço CA 42 S com características de soldabilidade destinadas a armaduras para concreto armado - Especificação. Rio de Janeiro.

_____. NBR ISO 6892-1 (2013 - versão corrigida 2015) .Materiais metálicos - Ensaio de tração. Parte 1 : Método de ensaio à temperatura .Rio de Janeiro.

AWS - *American Welding Society*. AWS D1.1 (2010). *Structural Welding Code - Steel*. 550 N.W. LeJeune Road, Miami.

AWS - *American Welding Society*. AWS D1.4 (2011). *Structural Welding Code — Reinforcing Steel* . 550 N.W. LeJeune Road, Miami

CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues. Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: Segundo a NBR 6118:2003. 3. ed. São Carlos: Ed. UFSCar, 2007.

CHIAVERINI, Vicente. Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos. 7. ed. ampl. e rev. - São Paulo, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1996.

DIAS, Luís Andrade de Mattos. Estruturas de aço: conceitos, técnicas e linguagem / Luís Andrade de Mattos Dias. -- São Paulo : Zigurate Editora, 1997

FUSCO, Péricles Brasiliense. Técnica de armar as estruturas de concreto. São Paulo: Pini, 1995.

HIBBELER, Russel Charles. Resistência dos Materiais. 7. ed. - São Paulo : Pearson Prentice Hall, 2010.

JIMÉNEZ MONTOYA, Pedro; GARCÍA MESEGUER, Alvaro; MORÁN CABRÉ, Francisco. Hormigon Armado: basada en la ehe austada al código modelo y al eurocódigo. 14. ed Barcelona: GG, 2001.

LEONHARDT, F.; MÖNNIG, E. Construções de Concreto. Rio de Janeiro: Interciência, 1977 - 3ª reimpressão, 2007. V.3.

MELCONIAN, Sarkis. Mecânica Técnica e Resistência dos Materiais. 8ª edição rev., ampl. e atual.- São Paulo: Érica, 1997.

PFEIL, Walter. Estruturas de aço: dimensionamento prático/ Walter Pfel, Michèle Pfeil. 8. ed. - Rio de Janeiro : LTC, 2009.

PINHEIRO, Antonio Carlos da Fonseca Bragança. Estruturas metálicas: cálculos, detalhes, exercícios e projetos. - São Paulo : E, Blücher, 2001.

Site http://longos.arcelormittal.com.br/solucoes/artigos/pdf/emendas_solda.pdf - Acessado em 23/04/2015.