



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo

PMI-1841 ENGENHARIA DE PERFURAÇÃO

AULA 18 – REVESTIMENTO - Exercícios

Wilson Siguemasa Iramina

Santos, novembro de 2016

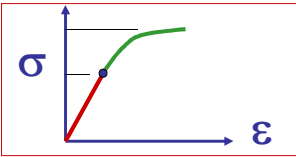
SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E HISTÓRICO
2. REVESTIMENTO: DESCRIÇÃO
3. FUNÇÕES DA COLUNA DE REVESTIMENTO
4. CARACTERÍSTICAS ESSENCIAIS DAS COLUNAS DE REVESTIMENTO
5. CLASSIFICAÇÃO DAS COLUNAS DE REVESTIMENTO QUANTO À FINALIDADE
6. ESPECIFICAÇÃO DA TUBULAÇÃO DE REVESTIMENTO
7. MANUSEIO DOS TUBOS E DESCIDA DA COLUNA AO POÇO
8. ESFORÇOS ATUANTES NA COLUNA DE REVESTIMENTO E SEU DIMENSIONAMENTO
9. BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA

Revisão - Classificação do Revest.

1. Diâmetro externo do tubo (ex. 9 5/8")
2. Espessura da parede do tubo (ex. 1/2")
3. Grau do material (ex. N-80)
4. Tipos de rosca e acoplamento (ex. API LCSG)
5. Comprimento de cada junta (RANGE) (ex. Range 3)
6. Peso nominal (Médio lbm/ft incluindo acoplamento)
(ex. 47 lb/ft)

Most Common Grades	Minimum Yield Strength (PSI)	Ultimate Tensile Strength (PSI)
H-40	40,000	60,000
→ J-55	55,000	75,000
K-55	55,000	95,000
C-75	75,000	95,000
L-80	80,000	95,000
→ N-80	80,000	100,000
C-90	90,000	100,000
C-95	95,000	105,000
→ P-110	110,000	125,000
V-150	150,000	160,000



The diagram shows a stress-strain curve with stress (σ) on the vertical axis and strain (ε) on the horizontal axis. A red line indicates the initial linear elastic region, ending at the yield strength (Y_p). A green curve shows the strain hardening region, peaking at the ultimate tensile strength (U_p) before necking.

↑

Y_p

↑

U_p

Comprimento das juntas

RANGE	1	16-25 ft
RANGE	2	25-34 ft
RANGE	3	> 34 ft.

Roscas e acoplamento de revestimento

API round threads - short	{ CSG }
API round thread - long	{ LCSG }
Buttress	{ BCSG }
Extreme line	{ XCSG }
Other ...	

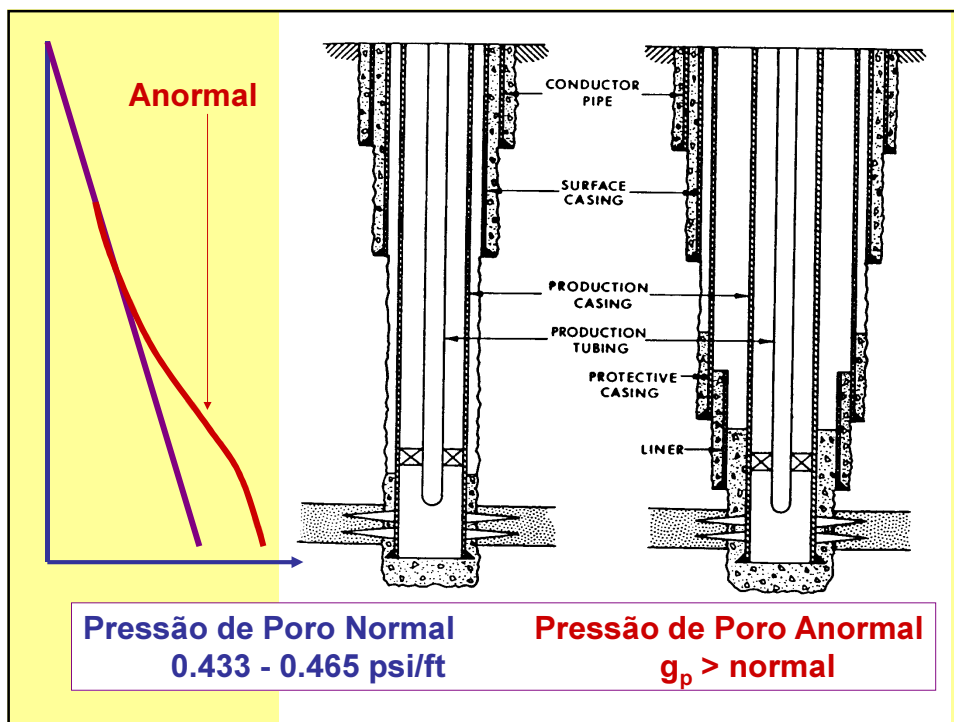
Veja o manual da Halliburton

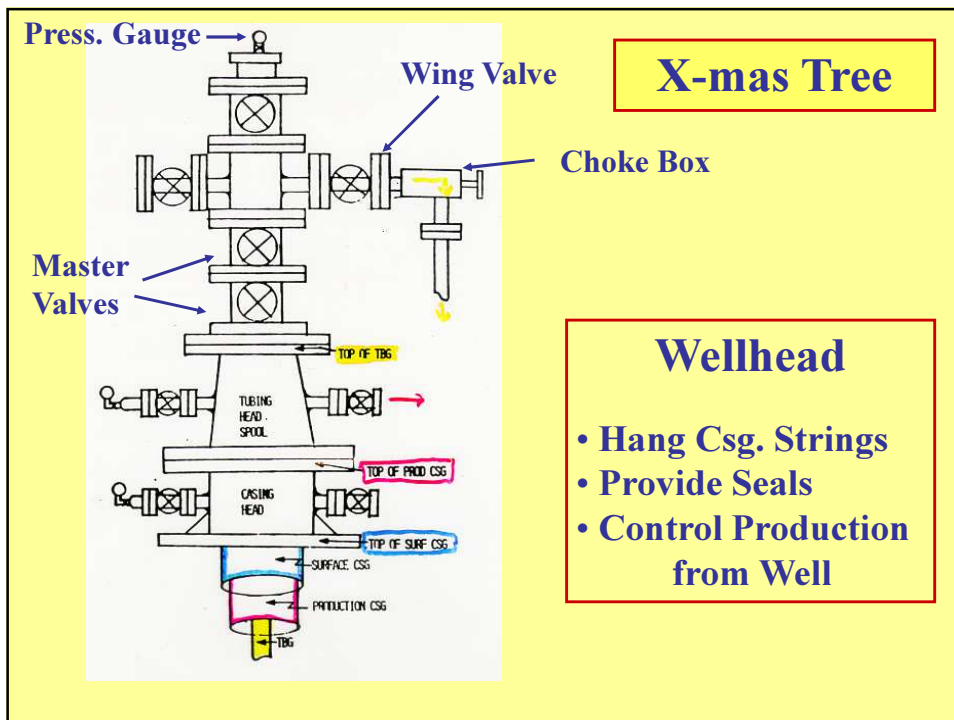
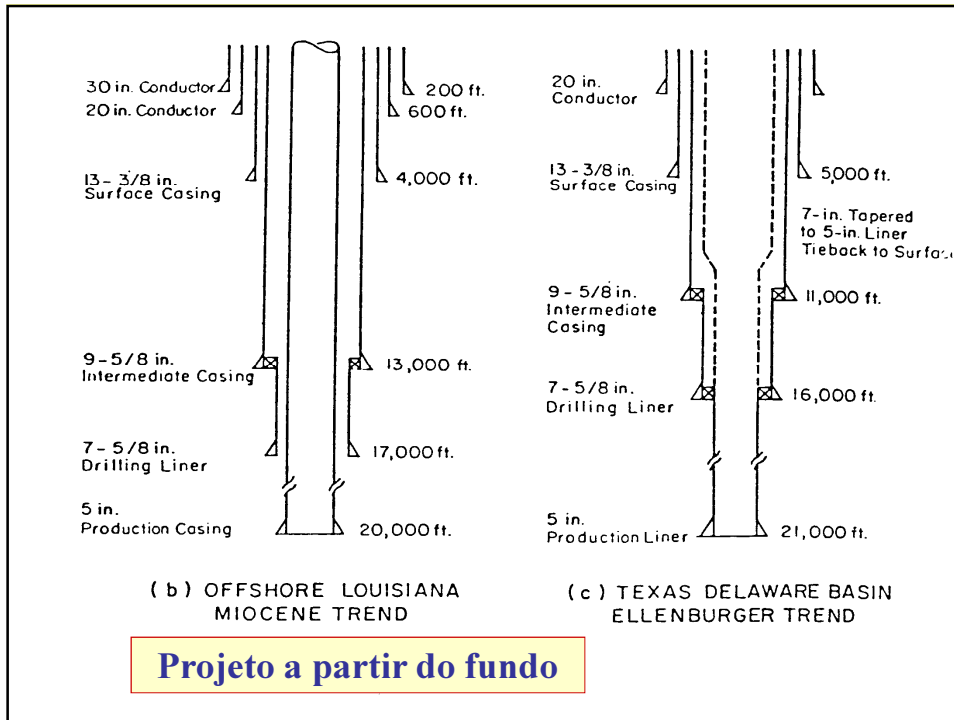
API Fatores de projeto (típicos)

Requerido

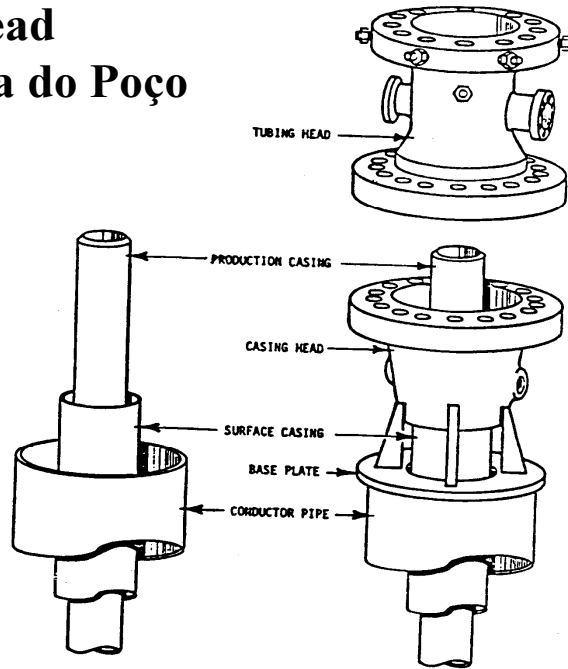
projeto

10,000 psi	Colapso	1.125	11,250 psi
100,000 lbf	Tração	1.8	180,000 lbf
10,000 psi	Pressão int	1.1	11,000 psi

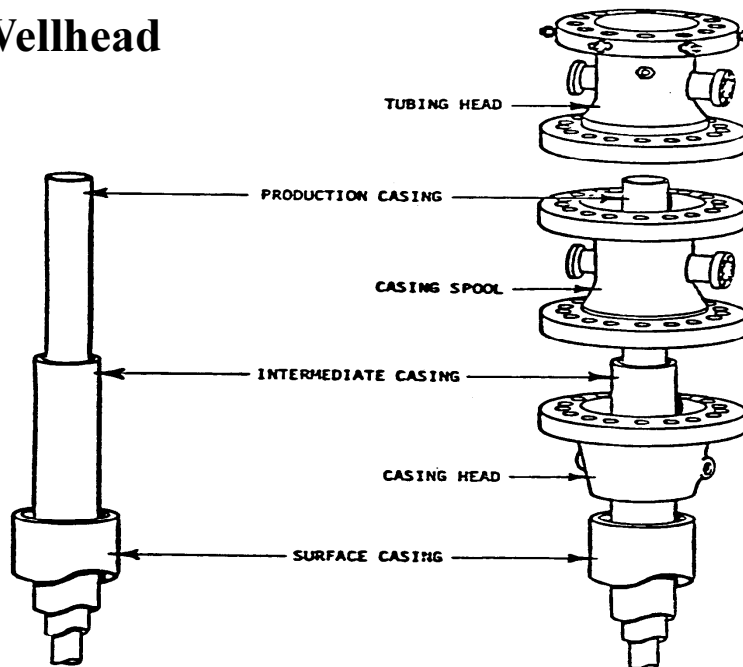


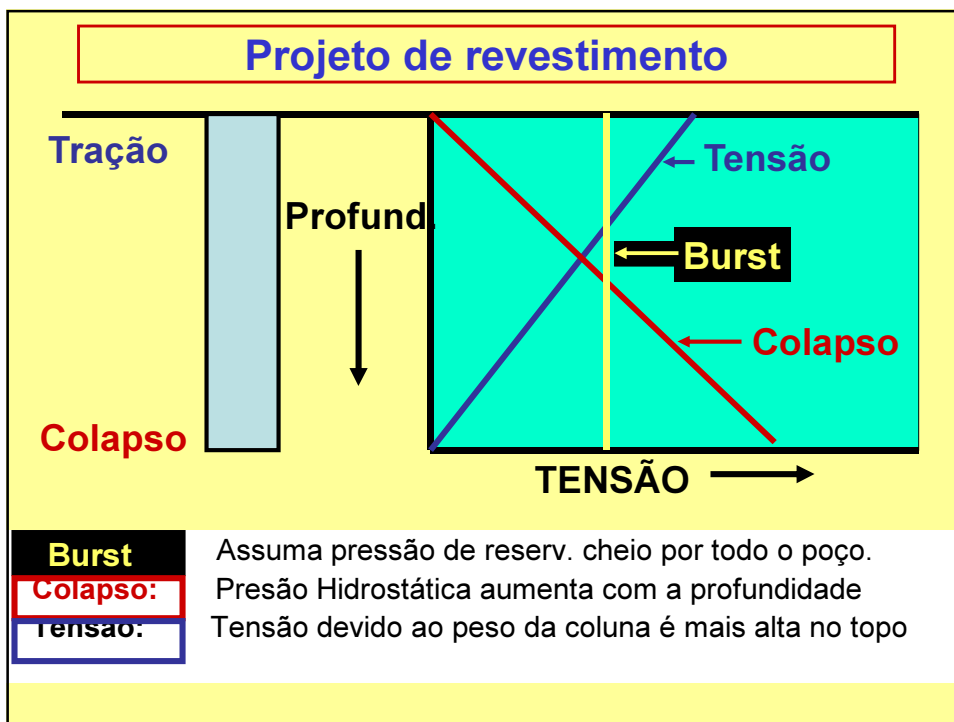
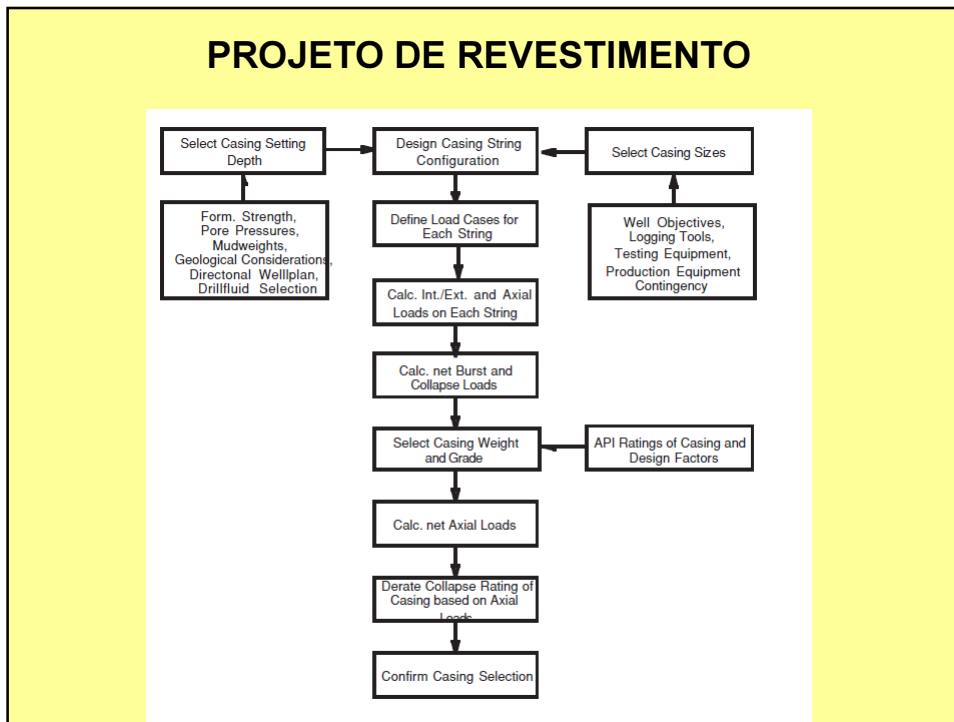


Wellhead Cabeça do Poço

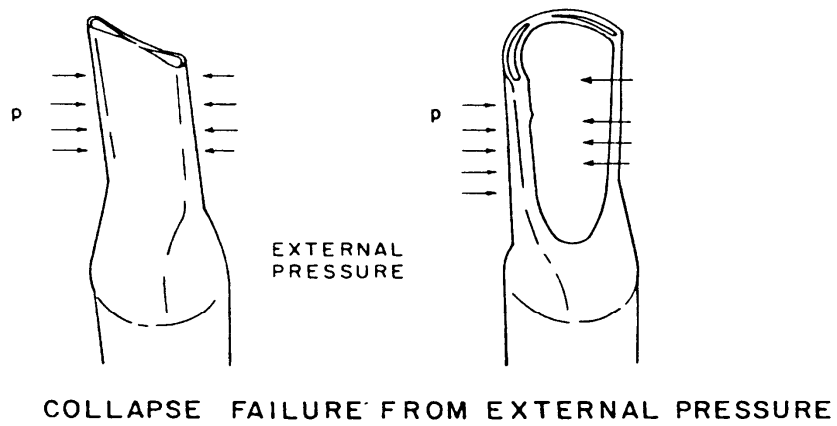


Wellhead



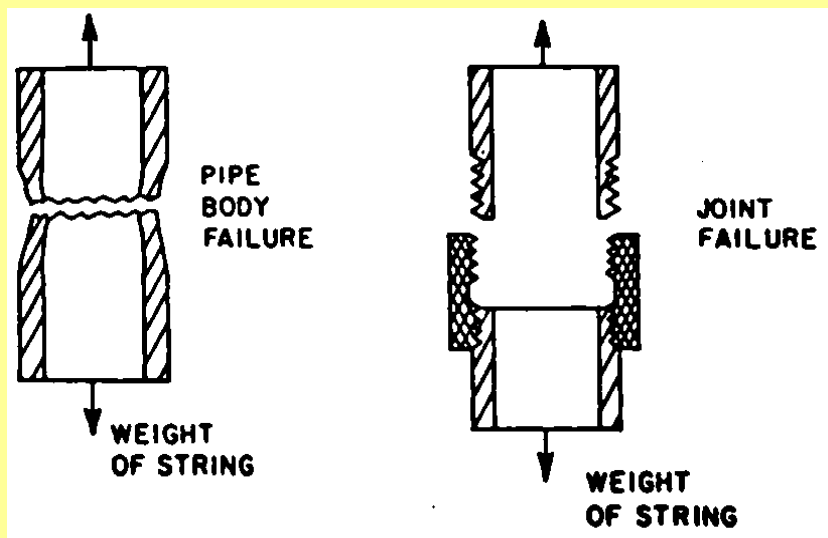


Projeto de revestimento - Colapso



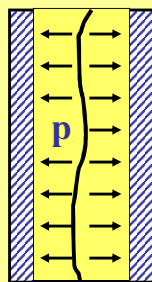
Pressão de colapso é afetada por tensão axial

Projeto de revestimento - Tração

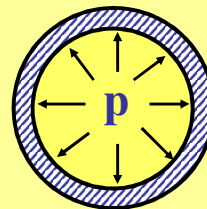


Projeto de revestimento - **Burst** (Pressão interna)

- ▶ Pressão de escoamento interno para o tubo
- ▶ Pressão de escoamento interno para acoplamentos
- ▶ Resistência ao vazamento da pressão interna



Pressão
Interna



Projeto de revestimento - **Burst**

Exemplo 1

Projete um revestimento de 7" com
10,000 ft.

Gradiente de pressão de poro = 0.5
psi/ft

Fator de segurança, $N_i=1.1$



Projete para **pressão interna** apenas.

Burst Example

1. Calcule a pressão de reservatório provável.

$$p_{\text{res}} = 0.5 \frac{\text{psi}}{\text{ft}} * 10,000 \text{ ft} = 5,000 \text{ psi}$$

2. Calcule a pressão de escoamento interno requerida

$$p_i = p_{\text{res}} * N_i = 5,000 * 1.1 = \underline{5,500 \text{ psi}}$$

$N_i = \text{Fator de projeto da API para BURST} = 1.1$

Exemplo

3. Selecione o grau e peso apropriados do revestimento (Halliburton Cementing):

Pressão interna requerida = 5,500 psi

7", J-55, 26 lb/ft possui BURST Rating de **4,980 psi**

7", N-80, 23 lb/ft possui BURST Rating de **6,340 psi**

7", N-80, 26 lb/ft possui BURST Rating de **7,249 psi**

Portanto, **use o revestimento N-80, 23 lb/ft**

Size O.D. In.	Grade	Wt. Per Ft. With Cplg., Lb.	Inside Dia. In.	Thread & Cplg.		Extreme Line		** Col'pse Resistance PSI	
				Drift Dia. In.	O.D. of Cplg. In.	Drift Dia. In.	O.D. of Box In.		
7	*F-25	17.00	6.538	6.413	7.656	—	—	1,100	
	H-40	17.00	6.538	6.413	7.656	—	—	1,450	
	H-40	20.00	6.456	6.331	7.656	—	—	1,980	
	J-55	20.00	6.456	6.331	7.656	—	—	2,270	
	J-55	23.00	6.366	6.241	7.656	6.151	7.390	3,270	
	J-55	26.00	6.276	6.151	7.656	6.151	7.390	4,320	
	K-55	20.00	6.456	6.331	7.656	—	—	2,270	
	K-55	23.00	6.366	6.241	7.656	6.151	7.390	3,270	
	K-55	26.00	6.276	6.151	7.656	6.151	7.390	4,320	
	C-75	23.00	6.366	6.241	7.656	6.151	7.390	3,770	
	C-75	26.00	6.276	6.151	7.656	6.151	7.390	5,250	
	C-75	29.00	6.184	6.059	7.656	6.059	7.390	6,760	
	C-75	32.00	6.094	5.969	7.656	5.969	7.390	8,230	
	C-75	35.00	6.004	5.879	7.656	5.879	7.530	9,710	
	C-75	38.00	5.920	5.795	7.656	5.795	7.530	10,680	
		N-80	23.00	6.366	6.241	7.656	6.151	7.390	3,830
		N-80	26.00	6.276	6.151	7.656	6.151	7.390	5,410
	N-80	29.00	6.184	6.059	7.656	6.059	7.390	7,020	
	N-80	32.00	6.094	5.969	7.656	5.969	7.390	8,600	
	N-80	35.00	6.004	5.879	7.656	5.879	7.530	10,180	
	N-80	38.00	5.920	5.795	7.656	5.795	7.530	11,390	

Plain End or Ext. Line	Internal Yield Pressure PSI**			** Body Yield Stgth. 1,000 Lbs.	Joint Strength - 1000 Lbs.**			
	Round	Thread	But-tress Thd.		Thread & Cplg. Joint		But-tress Thd.	Ext. Line Joint
					Round	Thread		
	1,440	—	—	123	118	—	—	—
2,310	2,310	—	—	196	122	—	—	—
2,720	2,720	—	—	230	176	—	—	—
3,740	3,740	—	—	316	234	—	—	—
4,360	4,360	4,360	4,360	366	284	313	432	499
4,980	4,980	4,980	4,980	415	334	367	490	506
3,740	3,740	—	—	316	254	—	—	—
4,360	4,360	4,360	4,360	366	309	341	522	632
4,980	4,980	4,980	4,980	415	364	401	592	641
5,940	—	5,940	5,940	499	—	416	557	632
6,790	—	6,790	6,790	566	—	489	631	641
7,650	—	7,650	7,650	634	—	562	707	685
8,490	—	8,490	7,930	699	—	633	779	761
9,340	—	8,660	7,930	763	—	703	833	850
10,120	—	8,660	7,930	822	—	767	833	917
6,340	23 lb/ft	6,340	6,340	532	—	442	588	666
7,240	26 lb/ft	7,240	7,240	604	—	519	667	675
8,160		8,160	8,160	676	—	597	746	721
9,060		9,060	8,460	745	—	672	823	801
9,960		9,240	8,460	814	—	746	876	895
10,800		9,240	8,460	877	—	814	876	965

Pressão de Colapso

Os seguintes fatores são importantes:

- ▶ A resistência à pressão de colapso de um tubo depende da **tensão axial**
- ▶ Fator de projeto da API



Projeto de revestimento

Pressão de colapso – com tensão axial

$$1. \quad Y_{PA} = Y_P \left\{ \left[1 - 0.75 \left(\frac{S_A}{Y_P} \right)^2 \right]^{1/2} - 0.5 \left(\frac{S_A}{Y_P} \right) \right\}$$

Y_{PA} = Grau equivalente da resistência ao escoamento da tensão axial , psi

Y_P = Resistência ao escoamento mínimo do tubo, psi

S_A = Tensão axial, psi (tensão é positiva)

Exemplo 3

Determine a resistência ao colapso para um revestimento de **5 1/2" O.D.**, **14.00 #/ft**, **J-55** submetida a uma carga axial de **100,000 lbf**

A tensão axial irá reduzir a resistência à pressão de colapso da seguinte forma:

$$Y_{PA} = \left[\sqrt{1 - 0.75 \left(\frac{S_A}{Y_p} \right)^2} - 0.5 \left(\frac{S_A}{Y_p} \right) \right] Y_p$$

$$S_A = \frac{F_A}{Area} = \frac{100,000}{\frac{\pi}{4} (5.5^2 - 5.012^2)} = 24,820 \text{ psi}$$

Exemplo 3

$$Y_{PA} = \left[\sqrt{1 - 0.75 \left(\frac{S_A}{Y_p} \right)^2} - 0.5 \left(\frac{S_A}{Y_p} \right) \right] Y_p$$

A tensão axial irá reduzir a capacidade da pressão de colapso para:

$$Y_{PA} = \left[\sqrt{1 - 0.75 \left(\frac{24,820}{55,000} \right)^2} - 0.5 \left(\frac{24,820}{55,000} \right) \right] 55,000$$

$$= 38,216 \text{ psi}$$

Deste modo, a carga axial reduziu a capacidade do **J-55** para uma capacidade equivalente ao **“J-38.2”**

Exemplo

As tabelas da Halliburton Cementing listam uma resistência ao colapso para o revestimento 5 ½ - in, 14.00 lb/ft J-55 de 3,120 psi.

A tensão axial neste caso reduziria a capacidade de resistência ao colapso para aproximadamente 2,550 psi.

Deve-se usar as tabelas da API para corrigir o efeito da tensão axial sobre a resistência ao colapso do revestimento.

MINIMUM COLLAPSE RESISTANCE OF CASING UNDER AXIAL LOAD GRADES J-55 AND K-55																
D IN	WT/FT LB/FT	D/T	AREA SQ. IN.	AXIAL STRESS - PSI												
				10000	5000	0	5000	10000	15000	20000	25000	30000	35000	40000	45000	50000
				COLLAPSE PRESSURE - PSI												
4.5	9.5	21.95	2.766	3440	3390	3310	3230	3120	3000	2850	2680	2470	2220	1930	1420	--
	10.5	20.09	3.009	4200	4110	4010	3880	3740	3570	3380	3150	2890	2570	2150	1540	--
	11.6	18	3.338	5220	5100	4960	4790	4590	4360	4100	3800	3450	2980	2380	1710	--
5	11.5	22.73	3.304	3170	3120	3060	2980	2890	2790	2660	2500	2320	2090	1820	1370	--
	13	19.76	3.773	4340	4250	4140	4010	3860	3690	3480	3240	2970	2640	2180	1570	--
	15	16.89	4.374	5880	5730	5560	5360	5120	4860	4550	4210	3730	3160	2530	1820	--
5.5	14	22.54	4.029	3230	3180	3120	3040	2950	2840	2700	2550	2350	2130	1850	1380	--
	15.5	20	4.514	4230	4150	4040	3920	3770	3600	3410	3180	2910	2590	2160	1550	--
	17	18.09	4.962	5180	5060	4910	4740	4550	4320	4060	3770	3430	2970	2370	1700	--
6.625	20	23	5.734	3070	3030	2970	2900	2820	2720	2590	2450	2270	2050	1790	1360	--
	24	18.82	6.937	4790	4690	4560	4410	4230	4030	3800	3530	3220	2850	2290	1640	--
7	20	25.74	5.749	2370	2320	2270	2210	2140	2090	2020	1930	1810	1670	1480	1220	--
	23	22.08	6.656	3400	3340	3270	3180	3080	2960	2820	2650	2450	2200	1910	1410	--
	26	19.34	7.549	4540	4440	4320	4190	4020	3840	3620	3370	3080	2730	2230	1600	--
7.625	26.4	23.25	7.519	2990	2950	2890	2830	2750	2650	2530	2390	2220	2010	1760	1340	--
8.625	24	32.67	6.934	1400	1390	1370	1350	1320	1290	1250	1200	1140	1070	980	870	--
	32	24.5	9.149	2600	2570	2530	2490	2430	2350	2260	2150	2010	1830	1610	1280	--
	36	21.56	10.336	3590	3530	3450	3360	3240	3110	2960	2770	2550	2290	1980	1440	--
9.625	36	27.34	10.254	2100	2070	2020	1970	1920	1850	1770	1670	1590	1480	1380	1150	--
	40	24.37	11.454	2640	2610	2570	2520	2460	2380	2290	2170	2030	1850	1630	1280	--
10.75	40.5	30.71	11.435	1630	1610	1580	1550	1520	1470	1420	1360	1280	1190	1090	960	--
	45.5	26.88	13.006	2170	2140	2090	2040	1980	1900	1820	1740	1650	1530	1370	1180	--
	51	23.89	14.561	2780	2750	2700	2650	2580	2500	2390	2260	2110	1920	1680	1310	--
11.75	47	31.33	13.401	1550	1540	1510	1490	1450	1410	1360	1310	1230	1150	1050	930	--
	54	27.01	15.463	2150	2120	2070	2020	1960	1890	1810	1720	1630	1520	1360	1170	--
	60	24.03	17.3	2740	2710	2660	2610	2540	2460	2360	2240	2080	1900	1660	1300	--
13.375	54.5	35.2	15.514	1140	1140	1130	1120	1110	1090	1060	1030	980	930	860	770	--
	61	31.1	17.487	1580	1560	1540	1510	1480	1440	1380	1320	1250	1160	1060	940	--
	68	27.86	19.445	2020	1990	1950	1900	1850	1780	1710	1620	1520	1420	1290	1120	--
16	75	36.53	21.414	1020	1020	1020	1010	1010	990	970	950	910	860	800	720	--
	84	32.32	24.112	1440	1420	1410	1390	1360	1320	1280	1230	1160	1090	1000	890	--
18.625	87.5	42.82	24.858	630	630	630	630	630	630	630	630	620	600	580	530	--
20	94	45.66	26.918	520	520	520	520	520	520	520	520	520	510	490	470	--
	106.5	40	30.631	770	770	770	770	770	770	770	760	740	710	670	610	--
	133	31.5	38.632	1530	1520	1500	1470	1440	1400	1350	1290	1220	1140	1040	920	--

**MINIMUM COLLAPSE RESISTANCE OF CASING
UNDER AXIAL LOAD
GRADES L-80 AND N-80**

D IN	WT/FT LBS/FT	D.T	AREA SQ. IN	AXIAL STRESS — PSI												
				-10000	-5000	0	5000	10000	15000	20000	25000	30000	35000	40000	45000	50000
4.5	11.6	18	3.338	6570	6470	6350	6230	6080	5920	5730	5530	5310	5050	4770	4460	4100
	13.5	15.52	3.836	8890	8720	8540	8330	8100	7850	7570	7260	6930	6560	6150	5710	5100
5	15	16.89	4.374	7520	7400	7250	7090	6910	6710	6490	6240	5970	5670	5340	4970	4560
	18	13.81	5.275	10970	10750	10500	10220	9910	9580	9150	8670	8150	7590	7000	6360	5680
	21.4	11.44	6.264	13490	13140	12760	12360	11890	11400	10870	10290	9680	9020	8310	7560	6740
	23.2	10.46	6.791	14620	14250	13830	13380	12890	12350	11780	11160	10490	9780	9010	8190	7310
5.5	17	18.09	4.962	6500	6400	6290	6160	6020	5860	5680	5480	5260	5010	4730	4420	4070
	20	15.24	5.828	9200	9020	8830	8610	8370	8100	7810	7490	7140	6760	6340	5810	5180
6.625	23	13.25	6.63	11770	11500	11160	10800	10400	9970	9500	9000	8470	7890	7270	6610	5900
	24	18.82	6.937	5940	5860	5760	5650	5530	5390	5230	5060	4860	4640	4400	4120	3800
7	28	15.89	8.133	8500	8340	8170	7970	7760	7520	7260	6970	6650	6300	5920	5500	4990
	32	13.95	9.177	10780	10560	10320	10050	9750	9420	9060	8590	8070	7520	6940	6300	5630
7	23	22.08	6.656	3890	3870	3830	3790	3740	3690	3620	3530	3430	3320	3180	3010	2820
	26	19.34	7.549	5570	5490	5410	5310	5200	5080	4940	4780	4600	4400	4170	3920	3620
	29	17.16	8.449	7280	7150	7020	6870	6700	6510	6300	6060	5800	5510	5200	4840	4440
	32	15.45	9.317	8960	8800	8610	8400	8170	7910	7630	7320	6980	6610	6200	5730	5120
7.625	35	14.06	10.172	10630	10420	10180	9910	9620	9300	8950	8520	8020	7470	6890	6260	5580
	38	12.96	10.959	12040	11730	11390	11020	10610	10170	9700	9190	8640	8050	7420	6750	6020
	26.4	23.25	7.519	3500	3450	3400	3340	3270	3190	3150	3090	3020	2930	2820	2690	2540
	29.7	20.33	8.541	4910	4850	4790	4720	4630	4530	4420	4290	4140	3980	3780	3560	3310
8.625	33.7	17.73	9.72	6790	6680	6560	6430	6270	6100	5910	5700	5460	5200	4900	4580	4210
	39	15.25	11.192	9180	9010	8820	8600	8360	8090	7800	7480	7130	6750	6330	5890	5180
	42.8	13.57	12.47	11300	11070	10810	10520	10180	9750	9300	8810	8280	7720	7110	6470	5770
	45.3	12.82	13.141	12160	11850	11510	11130	10720	10280	9800	9280	8730	8130	7500	6820	6080
8.625	47.1	12.2	13.745	12720	12400	12040	11650	11220	10750	10250	9710	9130	8510	7840	7130	6360
	36	21.56	10.336	4180	4140	4100	4050	3990	3920	3840	3740	3630	3500	3350	3170	2960
	40	19.17	11.557	5690	5610	5520	5420	5310	5180	5030	4870	4690	4480	4250	3980	3680
9.625	44	17.25	12.763	7200	7080	6950	6800	6630	6440	6230	6000	5750	5460	5150	4800	4410
	49	15.48	14.118	8930	8760	8580	8370	8140	7880	7600	7290	6960	6590	6180	5720	5110
	40	24.37	11.454	3170	3130	3090	3030	2980	2910	2840	2750	2660	2600	2520	2420	2290
9.625	43.5	22.13	12.559	3870	3840	3810	3770	3720	3660	3590	3510	3410	3300	3160	3000	2810
	47	20.39	13.572	4870	4820	4760	4680	4600	4500	4390	4260	4120	3950	3760	3540	3290
	53.5	17.66	15.547	6850	6740	6620	6480	6320	6150	5960	5740	5500	5240	4940	4610	4240
10.75	51	23.89	14.561	3310	3260	3220	3160	3100	3030	2950	2860	2810	2730	2640	2530	2390
	55.5	21.72	15.947	4090	4060	4020	3970	3920	3850	3770	3680	3570	3440	3290	3120	2920
11.75	60	24.03	17.3	3260	3220	3180	3120	3060	2990	2920	2830	2760	2690	2610	2500	2360
	68	27.86	19.445	2290	2280	2260	2240	2220	2180	2140	2100	2040	1970	1900	1810	1710
13.375	72	26.02	20.768	2730	2700	2670	2630	2590	2540	2490	2420	2350	2260	2160	2050	1970

Exemplo de projeto de revestimento

- Problema
- Fatores de projeto da API
- “Piores condições possíveis”
- Efeito da Tensão Axial na Resistência ao Colapso
- Iteração e Interpolação
- Projetar para pressão interna, Colapso e Tração

Exemplo de projeto de revestimento

Projete um revestimento de **9 5/8-in.**, **8.000-ft** para um poço com lama de perfuração **12,5 lbm/gal** e uma pressão de formação de poro de **6.000 psi**.

Apenas os graus e pesos estão disponíveis (**N-80, todos os pesos**). Use os fatores de projeto da API.

Faça o projeto para as “Piores condições possíveis”

Solução

Antes de resolver este problema, é necessário entender o que significa “Fatores de Projeto” e “Piores condições possíveis”

Fatores de projeto da API

Fatores de projeto são essencialmente “Fatores de segurança” que permitem projetar colunas de revestimento seguras e confiáveis. Cada operador pode ter seu próprio fator de projeto, baseado em sua experiência e condições do tubo.

Projeto de revestimento

Fatores de projeto da API :

Resistência à tração e da junta:	$N_T = 1.8$
Colapse (pressão externa):	$N_C = 1.125$
Burst (pressão interna):	$N_i = 1.1$

Projeto de revestimento

Isto significa que, por exemplo, no caso de projeto de um revestimento onde a força de tração máxima esperada é de **100.000 lbf**, devemos selecionar um tubo que possa aguentar $100.000 * 1.8 = 180.000$ **lbf** na tração.

Note que as tabelas da Halliburton Cementing trazem as resistências de tubo reais, **sem** os fatores de segurança embutidos.

Projeto de revestimento

A menos que seja especificado no problema, devemos assumir o seguinte:

Piores condições possíveis

1. Para **Colapso**, assuma que o revestimento está vazio dentro ($p = 0$ psig)
2. Para **Burst** assuma nenhum fluido de “backup” for a do revestimento ($p = 0$ psig)

Projeto de revestimento

Piores condições possíveis

3. Para **Tração**, assuma que não há efeito do empuxo
4. Para **Colapso**, assuma que não há efeito do empuxo

A coluna de revestimento deve ser projetada para suportar as condições de **burst, colapso e tração** esperadas.

As condições acima são bastante conservadoras. Elas foram também simplificadas para o entendimento mais fácil dos conceitos básicos.

Projeto de revestimento - Solução

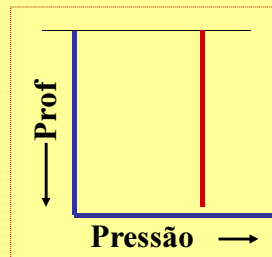
Requisitos para o Burst (baseado na pressão de poro esperada)

A coluna inteira de revestimento deve ser capaz de aguentar esta pressão interna sem estourar (burst).

$$P_b = \text{Pressão de poro} * \text{Fator de projeto}$$

$$= 6000 \text{ psi} * 1,1$$

$$P_b = 6600 \text{ psi}$$



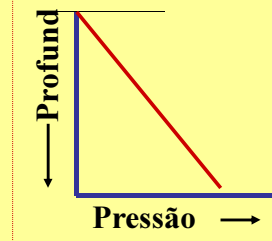
Projeto de revestimento - solução

Requisitos para Colapso

Para o colapso, **começamos pelo fundo** do revestimento e trabalharemos subindo.

Nosso critério de projeto será baseado na pressão hidrostática resultante da lama de **12,5 ppg** que estará presente no furo quando o revestimento é colocado, antes da cimentação.

Projeto de revestimento



Requisitos para Colapso

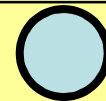
$$P_c = 0.052 * \text{Peso da lama} * \text{profund} * \text{Fator de projeto}$$

$$= 0.052 * 12.5 * 8,000 * 1.125$$

$$P_c = 5,850 \text{ psi} \leftarrow \text{necessário no fundo.}$$

Os requerimentos para o colapso em regiões superiores do furo são menos severos

Projeto de revestimento



Exigido: Burst: **6600 psi**

Colapso: **5850 psi**

Pipe Available for this string, 9 5/8" OD.:

Grade	#/ft	Plain End Area in ²	Halliburton Burst	Collapse	Comments
N-80	40.0	11.454	5,750	3,090	Fails in burst + collapse
N-80	43.5	12.559	6,330	3,810	Fails in burst + collapse
N-80	47.0	13.572	6,870	4,760	Fails in collapse
N-80	53.5	15.547	7,930	6,620	OK

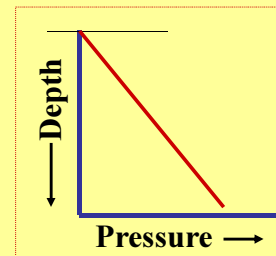
Projeto de revestimento

Note que 2 dos pesos do revestimento **N-80** atendem às exigências de **burst**, mas apenas o tubo de **53,5 #/ft** pode lidar com o **colapso** no fundo do furo (**5850 psi**).

O tubo de **53,5 #/ft** pode ser colocado provavelmente desde a superfície (devendo-se checar ainda a tração), mas pode haver alternativas de menor custo.

Projeto de revestimento

A que profundidade seríamos capazes de colocar o **N-80**, **47 #/ft**? A pressão do anular máxima a que o tubo estaria exposto seria:



$$P_c = \frac{\text{Pressão de colapso do tubo}}{\text{fator de projeto}} = \frac{4760}{1,125} = 4231 \text{ psi}$$

Projeto de revestimento

Primeira iteração

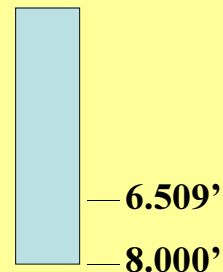
A que profundidade vemos esta pressão (**4231 psig**) em uma coluna de lama de **12,5 #/gal**?

$$P_c = 0,052 * 12,5 * h_1$$

$$\therefore h_1 = \frac{P_c}{0,052 * 12,5} = \frac{4,231}{0,052 * 12,5} = 6.509 \text{ ft}$$

Projeto de revestimento

Esta é a profundidade na qual o tubo poderia ser colocado se não houvesse tensão axial no tubo...



Mas a **6509'** temos $(8,000 - 6,509) = 1491'$ de tubos de **53.5 #/ft** abaixo.

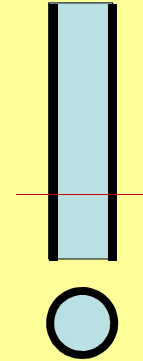
O peso deste tubo irá reduzir a resistência ao colapso do tubo de **47.0 #/ft!**

Projeto de revestimento

$$\text{Peso, } W_1 = 53.5 \text{ \#/ft} * 1,491 \text{ ft} \\ = 79,769 \text{ lbf}$$

Este peso resulta em uma
tensão axial no tubo de **47 \#/ft**

$$de S_1 = \frac{\text{weight}}{\text{area no fim}} = \frac{79.769 \text{ lbf}}{13,572 \text{ in}^2} = 5.877 \text{ psi}$$



Projeto de revestimento

As tabelas da API mostram que a tensão obtida acima irá reduzir a resistência ao colapso de **4.760** para algo entre

4.680 psi (com tensão 5.000 psi)
e 4.600 psi (com tensão 10.000 psi)

Projeto de revestimento

A interpolação entre estes valores mostra que a resistência ao colapso para uma tensão axial de **5.877 psi** é:

$$P_{cl} = P_1 - \left(\frac{S - S_1}{S_2 - S_1} \right) (P_1 - P_2)$$

$$P_{cl} = 4,680 - \frac{(5877 - 5000)}{(10000 - 5000)} * (4680 - 4600) = 4666 \text{ psi}$$

Com fator de projeto, $P_{cc1} = \frac{4666}{1,125} = 4148 \text{ psi}$

Projeto de revestimento

Esta (**4148 psig**) é a pressão a uma profundidade de

$$h_2 = \frac{4148}{0,052 * 12,5} = 6382 \text{ ft}$$

O que difere consideravelmente da profundidade inicial de **6.509 ft**, por isso necessitamos de uma segunda iteração.

**MINIMUM COLLAPSE RESISTANCE OF CASING
UNDER AXIAL LOAD
GRADES L-80 AND N-80**

D IN	WT. FT LB. FT	D/T	AREA SQ. IN.	AXIAL STRESS - PSI COLLAPSE PRESSURE - PSI												
				10000	5000	0	5000	10000	15000	20000	25000	30000	35000	40000	45000	50000
4.5	11.6	18	3.338	6570	6470	6350	6230	6080	5920	5730	5530	5310	5050	4770	4460	4100
	13.5	15.52	3.836	8890	8720	8540	8330	8100	7850	7570	7260	6930	6560	6150	5710	5100
5	15	16.89	4.374	7520	7400	7250	7090	6910	6710	6490	6240	5970	5670	5340	4970	4560
	18	13.81	5.275	10970	10750	10500	10220	9910	9580	9150	8670	8150	7590	7000	6360	5680
	21.4	11.44	6.264	13490	13140	12760	12350	11890	11400	10870	10290	9680	9020	8310	7560	6740
	24.1	10.46	6.791	14620	14260	13890	13380	12890	12360	11780	11160	10490	9780	9010	8190	7310
5.5	17	18.09	4.962	6500	6400	6290	6160	6020	5860	5680	5480	5260	5010	4730	4420	4070
	20	15.24	5.828	9200	9020	8830	8610	8370	8100	7810	7490	7140	6760	6340	5810	5180
	23	13.25	6.63	11770	11500	11160	10800	10400	9970	9500	9000	8470	7890	7270	6610	5900
6.625	21	18.82	6.937	5940	5860	5760	5650	5530	5390	5230	5060	4860	4640	4400	4120	3800
	28	15.89	8.133	8500	8340	8170	7970	7760	7520	7260	6970	6650	6300	5920	5500	4990
	32	13.95	9.177	10780	10560	10320	10050	9750	9420	9060	8590	8070	7520	6940	6300	5630
7	23	22.08	6.656	3890	3870	3830	3790	3740	3690	3620	3530	3430	3320	3180	3010	2820
	26	19.34	7.549	5570	5490	5410	5310	5200	5080	4940	4780	4600	4400	4170	3920	3620
	29	17.16	8.449	7280	7160	7020	6870	6700	6510	6300	6060	5800	5510	5200	4840	4440
	32	15.45	9.317	8960	8800	8610	8400	8170	7910	7630	7320	6980	6610	6200	5730	5120
	35	14.06	10.172	10630	10450	10180	9910	9520	9100	8650	8180	7690	7170	6630	6080	5580
	38	12.96	10.959	12040	11730	11390	11020	10610	10170	9700	9190	8640	8050	7420	6750	6020
7.625	26.4	23.25	7.519	3500	3450	3400	3340	3270	3190	3150	3090	3020	2930	2820	2690	2540
	29.7	20.33	8.541	4910	4850	4790	4720	4630	4530	4420	4290	4140	3980	3780	3560	3310
	33.7	17.73	9.72	6790	6680	6560	6430	6270	6100	5910	5700	5460	5200	4900	4580	4210
	39	15.25	11.192	9180	9010	8820	8600	8360	8090	7800	7480	7130	6750	6330	5800	5180
	42.8	13.57	12.47	11300	11070	10810	10520	10180	9750	9300	8810	8280	7720	7110	6470	5770
	45.3	12.82	13.141	12160	11850	11510	11130	10720	10280	9800	9280	8730	8130	7500	6820	6080
8.625	47.1	12.2	13.745	12720	12400	12040	11650	11220	10750	10250	9710	9130	8510	7840	7130	6360
	36	21.56	10.336	4180	4140	4100	4050	3990	3920	3840	3740	3630	3500	3350	3170	2960
	40	19.17	11.557	5690	5610	5520	5420	5310	5180	5030	4870	4690	4480	4250	3980	3680
	44	17.25	12.763	7200	7080	6950	6800	6630	6440	6230	6000	5750	5460	5150	4800	4410
9.625	49	15.48	14.118	8930	8760	8580	8370	8140	7880	7600	7290	6960	6590	6180	5720	5110
	40	24.37	11.454	3170	3130	3090	3030	2980	2910	2840	2750	2660	2600	2520	2420	2290
	43.5	22.13	12.559	3870	3840	3810	3770	3720	3660	3590	3510	3410	3300	3160	3000	2810
	47	20.39	13.572	4870	4820	4760	4680	4600	4500	4390	4280	4120	3950	3760	3540	3290
10.75	51	23.89	14.561	3310	3260	3220	3160	3100	3030	2950	2860	2810	2730	2640	2530	2390
	55.5	21.72	15.947	4090	4060	4020	3970	3920	3850	3770	3680	3570	3440	3290	3120	2920
11.75	60	24.03	17.3	3260	3220	3180	3120	3060	2990	2920	2830	2760	2690	2610	2500	2360
	68	27.86	19.445	2290	2280	2260	2240	2220	2180	2140	2100	2040	1970	1900	1810	1710
13.375	72	26.02	20.768	2730	2700	2670	2630	2590	2540	2490	2420	2350	2260	2160	2050	1970

GRADES L-80 AND N-80

MINIMUM COLLAPSE RESISTANCE UNDER AXIAL LOAD

D IN	WT/FT LB/FT	D/T	AREA SQ. IN.	AXIAL STR COLLAPSE PR							
				10000	5000	0	5000	10000	15000	20000	25000
9.625	40	24.37	11.454	3170	3130	3090	3030	2980	2910	2840	
9.625	43.5	22.13	12.559	3870	3840	3810	3770	3720	3660	3590	
9.625	47	20.39	13.572	4870	4820	4760	4680	4600	4500	4390	
9.625	53.5	17.66	15.547	6850	6740	6620	6480	6320	6150	5960	

Projeto de revestimento

Segunda iteração

Agora considere colocar um tubo de 47 #/ft na nova profundidade de 6382 ft.

$$W_2 = (8.000 - 6.382) * 53,5 = 86.563 \text{ lbf}$$

$$S_2 = \frac{86.563 \text{ lbf}}{13,572 \text{ in}^2} = 6.378 \text{ psi}$$

Projeto de revestimento

Interpolando de novo,

$$P_{c1} = \frac{1}{\text{D.F.}} \left[P_1 - \left(\frac{S - S_1}{S_2 - S_1} \right) (P_1 - P_2) \right]$$

$$P_{cc2} = \frac{1}{1.125} \left\{ 4,680 - \left[\frac{6.378 - 5000}{5000} * (4.680 - 4.600) \right] \right\} = 4.140 \text{ psi}$$

Esta é a pressão a uma profundidade de

$$h_3 = \frac{4.140}{0,052 * 12,5} = 6.369 \text{ ft}$$

Projeto de revestimento

Isto está dentro do valor de **13 ft** assumido.
Se for necessário uma maior precisão (geralmente não), então proceda com a:

Terceira iteração

$$h_3 = 6.369'$$

$$W_3 = (8.000 - 6.369) * 53,5 = 87.259 \text{ lbf}$$

$$S_3 = \frac{87.259}{13,572} = 6.429 \text{ psi}$$

$$P_{cc3} = ?$$

Projeto de revestimento

Terceira iteração - cont

$$\text{fazendo } P_{cc3} = \frac{1}{1,125} \left\{ 4.680 - \frac{6.429 - 5.000}{5.000} * (4.680 - 4.600) \right\}$$

$$= 4.140 \text{ psi} = P_{cc2}$$

Projeto de revestimento

Terceira iteração - cont

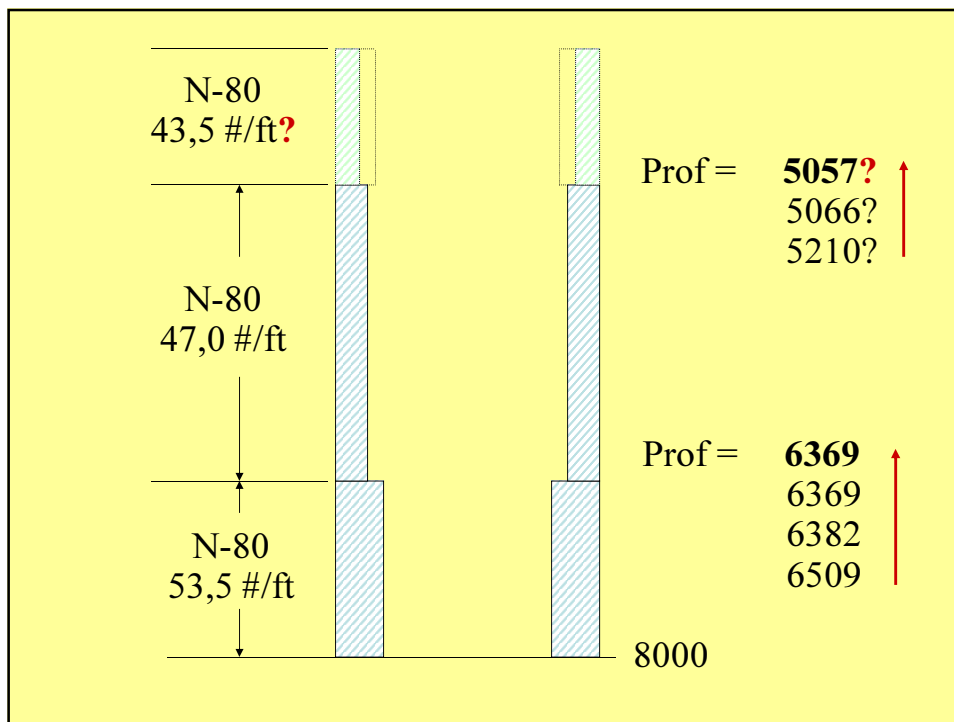
Esta é resposta que procurávamos, i.e., podemos colocar o tubo **47 #/ft** N-80 a uma profundidade de **6369 ft**, e um tubo de **53,5 #/ft** entre **6369** e **8000 ft**.

Talvez esta coluna possa chegar até a superfície (cheque a tração), ou talvez uma coluna até mesmo mais econômica com um tubo de **43,5 #/ft**. O que você acha?

PROJETO DE REVESTIMENTO

Em algumas profundidades o tubo de **43,5 #/ft** seria capaz de lidar com os requerimentos de colapso, mas já havíamos determinado que ele não atenderia aos requerimentos de pressão interna (burst).

∴ RESPOSTA É NÃO!



Verificar a tração

O peso na junta do topo do revestimento seria

$$(6.369 \text{ ft} * 47,0 \# / \text{ft}) + (1631 \text{ ft} * 53,5 \# / \text{ft})$$

$$= 386.602 \text{ lbs peso real}$$

Para um fator de projeto de **1,8** para a tração, uma resistência do tubo de

$$1,8 * 386.602 = 695.080 \text{ lbf é exigida}$$

Verificar a tração

As tabelas da Halliburton cementing dão uma tensão de escoamento de **1.086.000 lbf** para o corpo do tubo e uma resistência da junta de **905.000 lbf** para LT & C.

*∴ um tubo com 47.0 #/ ft
está OK até a superfície*