

## 4 Determinação das pressões de ruptura

A depender do método utilizado para o cálculo da pressão de ruptura, é necessário conhecer a espessura de parede, o diâmetro, a resistência ao escoamento ou à tração do aço, o comprimento do defeito, a profundidade máxima do defeito ou o perfil da área corroída de cada espécime.

### 4.1 Espessura de parede

A espessura nominal do duto de onde foram retirados os espécimes é de 6,35 mm. Segundo a norma API Specification 5L [8], o valor de espessura admissível a ser fornecido pelo fabricante, para o aço e diâmetro em questão, pode variar de +15 a -12,5% da espessura nominal. O levantamento da espessura por medição manual por ultra-som, na região compreendida entre 8, 12 e 4 horas nos cinco espécimes apresentou os valores relacionados na tabela 6.

Tabela 6 – Valores de espessura na região compreendida entre 8, 12 e 4 h

Espécime	Espessura Máxima (mm)	Espessura Média (mm)	Espessura Mínima (mm)	Medições acima de 6,35 mm (%)
T02	6,62	6,03	5,60	6,1
T04	6,78	6,23	5,84	24,6
T05	6,85	6,04	5,51	9,5
T06	7,25	6,56	5,97	85,3
T10	6,86	6,09	5,05	6,5

Foram realizados cálculos para determinação da pressão de ruptura utilizando a espessura média de cada espécime e a espessura nominal.

### 4.2 Diâmetro

O valor do diâmetro nominal dos espécimes é de 457,2 mm. O valor do diâmetro de cada espécime foi obtido indiretamente pela medição da circunferência de cada espécime, estando representado na tabela 7.

Tabela 7 – Diâmetro dos espécimes

Espécime	Diâmetro (mm)
T02	457,7
T04	457,7
T05	457,7
T06	456,5
T10	457,1

As pressões de ruptura foram calculadas com o diâmetro nominal e com o diâmetro medido para cada espécime.

### 4.3

#### Resistência ao escoamento e à tração

Os valores de SMYS e SMTS para os tubos especificados como API 5L X46 são respectivamente 46.000 Psi(317,4 MPa) e 63.000 Psi( 434,6 MPa). Entretanto, os utilizados para o cálculo da pressão de ruptura foram os valores médios das resistências ao escoamento( $\sigma_{yTm}$ ) e à tração( $\sigma_{uTm}$ ), obtidos dos ensaios de tração de corpos de prova retirados transversalmente de cada espécime, os quais estão representados na tabela 8.

Tabela 8 – Valores médios das resistências ao escoamento e à tração

Espécime	$\sigma_{yTm}$		$\sigma_{uTm}$	
	(MPa)	(kgf/cm <sup>2</sup> )	(MPa)	(kgf/cm <sup>2</sup> )
T02	345,4	3521	568,2	5792
T04	355,7	3626	539,2	5496
T05	285,1	2906	428,5	4368
T06	357,9	3648	458,2	4671
T10	362,3	3693	557,3	5681

### 4.4

#### Perfil de Corrosão

O mapeamento de espessura manual por ultra-som dos espécimes foi registrado em uma tabela que representa o tubo planificado, onde as colunas são as geratrizes longitudinais e as linhas são as circunferências do tubo. Esse mapeamento foi executado nos espécimes, originalmente com comprimentos variando de 3,5 a 6,0 m, numa malha de 20 mm x 20 mm, tendo as geratrizes longitudinais da área de interesse (posição 4 a 8 h) marcadas com as letras F, G,

H, I, J, K, L, M, N, O, P, Q, R, S, T, U, V, W, X Y, Z, AA, BB, CC e DD e as circunferências numeradas de 1 em diante.

Depois de cortados para a instalação dos tampos, os espécimes ficaram com os comprimentos apresentados na tabela 9.

Tabela 9 – Comprimento dos espécimes sem tampo

Espécime	Comprimento (mm)
T02	2780
T04	2760
T05	2795
T06	2700
T10	2750

Com o comprimento de cada espécime e conhecendo-se a região eliminada, ficou definido o mapeamento de espessura manual para cada espécime.

O mapeamento de espessura do tipo CSCAN foi realizado com medições numa malha de 5 mm x 5 mm, com varreduras de 495 mm de comprimento. Essas medições foram iniciadas sobre um ponto conhecido da medição manual, e com o registro do comprimento de cada sobreposição, foi possível montar uma tabela de medições CSCAN com os correspondentes pontos das medições manuais.

As geratrizes longitudinais da medição CSCAN foram demarcadas por F4, F3, F2, F1, G4, G3, G2, G1,....., CC4, CC3, CC2, CC1, DD4, DD3, DD2 e DD1, sendo que a geratriz F1 corresponde à geratriz F da medição manual, a G1 corresponde a G, e assim por diante.

Com o mapeamento do defeito, vários perfis podem ser montados. Segundo Kiefner e Vieth [3], o perfil a ser considerado para a avaliação do defeito requer um julgamento baseado na experiência e quando isto não é possível, o procedimento mais recomendável é combinar todos os perfis e assumir o caso mais desfavorável.

Para cada uma das medições manuais e mecanizadas realizadas nos 5 espécimes tubulares, foram montados dois tipos de perfil, considerando todo o comprimento do defeito. O perfil mais desfavorável foi levantado tomando-se os pontos de cada seção circunferencial dentro da faixa mais corroída de cada espécime. Este perfil chamado de “River Bottom”, apesar de ser obtido dentro de uma região corroída, pode selecionar pontos em que a interação é pequena, gerando uma área de corrosão maior do que a que deveria ser considerada. O outro perfil, denominado de Perfil Geratriz de Ruptura, foi montado a partir dos pontos medidos mais próximos à geratriz onde se deu o rompimento. Este perfil se aproxima mais àquele que realmente contribuiu para a ruptura do defeito.

Os parágrafos a seguir definem mais detalhadamente a forma de geração dos perfis “River Bottom” e Geratriz de Ruptura, para cada tipo de medição:

Perfil “River Bottom” da Medição manual – Foi gerado tomando-se o menor valor de espessura de sete medições adjacentes de cada seção circunferencial, tendo a geratriz onde houve a ruptura como centro. O menor valor de espessura foi retirado de uma faixa corroída de 120 mm de largura.

Perfil Geratriz de Ruptura da Medição Manual – O perfil foi construído com os pontos que compõem a geratriz mais próxima da linha de ruptura de cada espécime.

Perfil “River Bottom” do CSCAN – Foi gerado tomando-se o menor valor de espessura de 25 medições adjacentes de cada seção circunferencial, tendo a geratriz onde houve a ruptura como centro. O menor valor de espessura foi retirado de uma faixa de 120 mm de largura.

Perfil Geratriz de Ruptura do CSCAN - O perfil foi gerado tomando-se o menor valor de espessura de 7 medições adjacentes de cada seção circunferencial, tendo a geratriz onde houve a ruptura como centro. O menor valor de espessura foi retirado de uma faixa de 30 mm de largura.

O cálculo da pressão de ruptura pelo método do “Effective Area”, utilizando o programa computacional RSTRENG, está limitado a um perfil de corrosão com no máximo 100 pontos de dados de entrada, conforme observado durante a utilização deste programa e, posteriormente, confirmado por correspondência eletrônica [36] enviada pela empresa que o desenvolveu.

Para que se pudesse comparar os resultados dos diferentes métodos, foi definido que todos os perfis estudados teriam no máximo 100 pontos. Assim, todos os perfis foram montados, tomando por base o ponto onde se iniciou a ruptura do espécime, procurando, dentro do possível, ter este ponto como o centro do perfil.

Para todos os espécimes, a partir dos perfis montados com o comprimento total de cada espécime, foram criados perfis com os seguintes comprimentos:

Medição manual – Foram montados dois perfis, o primeiro com 100 pontos espaçados de 20 mm e denominado de MM(100,20), correspondendo à um comprimento de defeito de 1980 mm, e o segundo com 50 pontos espaçados de 20 mm e 980 mm de comprimento chamado de MM(50,20). As figuras 13 e 14 apresentam os mapeamentos manuais por ultra-som do espécime T02, na área corroída, e que foram utilizados para montar os perfis MM(100,20) e MM(50,20). A cor branca indica espessura de parede maior que 6,35 mm, a azul entre 5,72 a 6,35 mm, a amarela entre 5,08 a 5,72 mm, a vermelha entre 4,45 a 5,08 mm e a vermelha escura menor que 4,45 mm. A célula cinza localizada na primeira coluna indica o ponto onde se iniciou a ruptura.

Medição CSCAN – Foram montados dois perfis, cada um com 100 pontos espaçados de 10 mm e 990 mm de comprimento. Como a medição CSCAN foi realizada coletando pontos a cada 5 mm, os perfis foram montados tomando-se pontos alternados, um sim outro não, ficando eles defasados de 5 mm. Estes perfis foram denominados de perfil ímpar CSCAN (100,10, i) e perfil par CSCAN(100,10, p). As figuras 15 e 16 apresentam os mapeamentos mecanizados por ultra-som do espécime T02, da área corroída, e que foram utilizados para montar os perfis CSCAN (100,10, i) e CSCAN (100,10, p).

As figuras do Apêndice C representam os mapeamentos manuais e mecanizados dos demais espécimes.

Além destes perfis, para o espécime T02 foram levantados os perfis MM(25,20), CSCAN(50,20, i), CSCAN(50,10, i) e CSCAN(100,5).

As tabelas 10 e 11 apresentam os perfis levantados para cada espécime, onde assinalados com “x”, bem como os demais parâmetros utilizados para o cálculo da pressão de ruptura, consideradas neste estudo.

As células sombreadas da tabela 10 indicam os perfis que foram utilizados para atingir o principal objetivo deste trabalho de tese, conforme relatado no subitem 1.2, e que foram analisados no subitem 5.4.

Tabela 10 - Perfis com espessuras e diâmetros medidos

Perfil River Bottom, t e D medidos, $\sigma_{yTm}$ e $\sigma_{uTm}$									
Comprimento aproximado(mm)	2000	1000				500			
Espécime	MM (100,20)	MM (50,20)	CSCAN (100,10,i)	CSCAN (100,10,p)	CSCAN (50,20,i)	MM (25,20)	CSCAN (100,5)	CSCAN (25,20,i)	CSCAN (50,10,i)
T02	X	X	X	X	X	X	X	X	X
T04	X	X	X	X	-	-	-	-	-
T05	X	X	X	X	-	-	-	-	-
T06	X	X	X	X	-	-	-	-	-
T10	X	X	X	X	-	-	-	-	-

Tabela 11 - Perfis com espessuras e diâmetros nominais

Perfil "River Bottom" ou Perfil Geratriz de Ruptura, t e D nominais, $\sigma_{yTm}$ e $\sigma_{uTm}$				
Comprimento aproximado (mm)	2000	1000		
Espécime	MM (100,20)	MM (50,20)	CSCAN (100,10,i)	CSCAN (100,10,p)
T02	X	X	X	X
T04	X	X	X	X
T05	X	X	X	X
T06	X	X	X	X
T10	X	X	X	X

	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	BB	CC	DD
01	578	580	582	585	583	588	587	549	574	542	565	614	594	585	581	574	628	558	576	555	578	577	568	575	648
02	578	580	587	583	588	600	582	584	572	553	557	533	433	424	549	579	567	578	532	546	577	581	682	576	538
03	578	600	580	579	584	583	579	572	548	535	588	474	567	583	562	566	587	565	564	563	578	681	581	582	567
04	584	583	614	600	537	583	604	584	600	581	567	562	555	544	568	554	566	558	636	641	578	627	538	532	582
05	585	567	532	534	585	601	576	638	582	545	556	588	468	454	611	555	566	577	566	574	574	579	588	537	532
06	588	554	582	584	581	588	588	535	537	562	586	546	528	533	567	584	579	578	563	534	566	586	582	682	582
07	583	594	536	605	605	535	538	533	654	583	563	484	473	537	556	538	537	583	628	558	531	576	588	531	582
08	588	584	681	584	531	648	582	538	578	585	534	546	484	452	467	538	572	632	532	577	574	578	682	681	535
09	532	535	600	585	534	618	534	573	638	618	427	553	483	657	565	563	532	588	615	632	532	641	583	688	532
10	532	577	533	618	579	611	535	532	532	581	456	575	535	535	538	582	567	628	574	533	577	588	576	583	583
11	584	685	532	683	534	532	683	532	585	588	636	424	463	538	523	684	583	688	578	532	681	681	536	537	534
12	588	586	538	588	532	576	535	584	577	585	524	433	565	584	578	581	556	682	538	588	583	584	568	532	617
13	538	658	666	688	581	588	533	573	664	578	544	666	541	531	576	686	588	682	588	585	532	681	641	643	648
14	582	585	582	647	582	648	578	532	532	648	613	532	615	549	532	627	688	655	651	588	664	645	634	574	537
15	532	534	538	681	584	573	576	642	581	582	551	585	538	641	567	588	538	574	631	581	585	635	665	685	538
16	584	584	638	583	588	581	578	537	534	538	614	613	648	525	628	576	653	647	658	586	624	645	583	586	585
17	585	584	600	563	585	575	588	581	576	578	565	588	544	432	528	631	558	576	536	588	658	585	537	587	681
18	586	578	587	538	572	573	588	573	578	554	566	614	558	532	638	587	586	625	584	552	578	584	566	583	537
19	587	588	600	584	583	583	531	536	588	583	543	588	584	533	528	613	574	572	582	685	681	583	528	588	563
20	600	588	536	578	564	554	584	578	488	513	483	561	572	586	587	581	573	686	614	558	574	588	535	535	618
21	583	574	586	557	576	567	564	582	573	551	553	534	487	488	618	578	572	587	683	565	588	565	574	585	576
22	578	682	578	584	535	578	536	531	546	533	534	478	557	588	562	578	532	532	572	682	588	584	584	534	573
23	578	575	531	581	573	568	578	576	611	553	538	481	478	565	578	685	538	532	535	567	583	578	579	573	586
24	612	573	572	578	574	578	578	555	575	618	687	485	487	435	635	556	584	654	584	644	575	572	583	575	578
25	685	583	563	565	645	578	581	551	578	538	622	558	438	561	588	536	658	583	535	578	631	575	538	532	585
26	584	585	532	585	533	578	547	564	688	543	485	588	468	563	641	577	621	646	636	576	632	532	682	532	532
27	585	536	584	684	571	612	612	648	626	554	532	471	432	627	564	641	681	688	534	574	631	581	584	536	686
28	572	587	584	577	688	574	585	568	578	554	438	463	433	558	531	648	585	648	641	643	581	582	532	534	537
29	532	584	579	583	535	575	583	567	563	532	548	432	482	452	573	685	532	617	535	586	572	556	588	585	535
30	581	587	577	532	578	588	583	546	563	566	537	685	534	648	648	575	534	534	532	634	537	634	533	683	618
31	572	585	586	534	536	687	573	552	551	555	528	586	581	564	532	635	533	531	588	618	578	588	622	531	583
32	684	585	583	535	581	688	565	558	552	573	588	476	587	537	531	548	536	683	577	572	575	578	641	683	535
33	584	585	532	612	588	578	586	563	543	518	431	515	648	581	583	583	578	581	576	631	576	611	622	647	536
34	584	594	531	532	683	532	567	585	563	551	511	463	463	572	538	536	537	587	576	573	582	686	532	576	582
35	533	533	587	581	685	567	574	576	566	524	535	515	565	573	532	574	571	537	532	586	588	588	588	588	583
36	562	588	533	537	582	534	578	542	537	556	683	474	482	618	578	583	563	586	578	577	585	583	532	574	531
37	562	583	686	683	573	586	588	563	584	576	486	432	473	538	578	578	538	535	572	567	571	588	532	531	531
38	553	578	686	588	584	683	588	566	576	527	543	473	473	558	588	538	578	538	573	567	571	573	573	682	581
39	533	574	581	533	533	581	572	581	581	578	488	464	461	535	578	584	585	587	574	532	686	688	535	532	532
40	531	532	532	538	534	611	686	535	683	558	548	545	688	433	583	576	534	685	534	576	578	566	537	683	538
41	581	581	581	531	535	616	615	582	588	553	578	622	488	474	546	578	683	673	588	533	588	534	573	588	587
42	536	536	683	535	682	533	581	537	578	553	533	584	481	568	585	535	584	687	586	573	583	533	587	583	575
43	536	538	588	532	535	583	682	538	566	687	483	433	532	586	575	584	588	576	531	574	535	533	686	686	587
44	532	533	618	538	533	681	688	573	581	567	516	462	433	558	531	618	534	588	583	626	586	581	532	586	535
45	532	681	632	575	583	533	618	581	536	576	537	474	448	533	578	682	584	538	588	585	577	531	538	582	576
46	583	538	538	681	685	532	585	533	588	538	575	525	478	585	551	537	683	535	533	586	584	586	586	681	537
47	578	536	685	683	683	533	576	577	585	581	543	488	474	583	585	574	587	585	532	575	533	536	532	587	587
48	681	662	588	588	588	582	585	532	576	523	538	582	433	433	536	581	617	585	532	572	583	586	535	584	534
49	681	583	535	533	683	584	534	618	533	563	556	434	434	572	556	575	534	585	572	573	585	584	588	628	628
50	581	588	587	582	532	587	532	588	578	553	563	583	512	556	584	578	611	577	581	538	584	538	686	634	534
51	581	583	535	538	578	538	614	658	588	567	518	456	462	568	584	538	585	573	568	535	636	584	644	688	577
52	535	588	681	537	588	534	687	576	563	548	535	516	532	551	586	572	572	585	635	572	536	533	531	643	575
53	534	583	587	588	585	531	585	573	554	576	614	536	624	682	563	585	584	538	588	631	658	587	534	648	588
54	573	583	616	584	581	617	571	581	534	576	527	554	523	545	543	537	535	588	532	564	588	572	567	574	531
55	583	585	576	533	584	572	628	585	586	574	588	581	543	543	683	536	577	578	574	648	583	585	582	573	574
56	531	588	537	538	531	576	537	585	538	533	538	534	685	526	538	543	537	531	572	568	567	631	533	538	578
57	576	688	587	585	573	585	578	682	568	538	554	545	542	536	531	575	578	573	588	566	538	575			

143	500	500	537	502	532	507	532	500	570	553	563	503	512	556	504	570	611	577	501	530	504	530	535	606	534
140	501	503	535	530	570	530	614	650	500	567	510	456	465	560	504	500	505	573	560	563	636	504	644	630	577
141	535	500	601	537	500	534	607	576	563	540	535	516	532	551	500	572	572	505	575	572	536	533	531	643	575
142	534	503	537	500	505	531	505	573	654	576	614	536	624	602	563	505	504	530	636	550	507	534	640	500	581
143	573	503	616	504	501	617	574	501	534	576	527	554	523	545	543	537	535	500	532	564	500	572	567	574	651
144	503	505	576	533	504	572	620	505	506	574	500	581	543	543	603	536	577	570	574	640	503	505	502	573	574
145	531	500	537	530	531	576	537	505	530	533	530	534	605	526	530	543	537	531	572	560	567	631	533	530	570
146	576	600	507	505	573	505	570	602	560	530	554	545	542	536	531	575	570	573	500	566	530	575	505	501	577
147	507	503	502	600	577	537	562	533	543	565	525	611	545	604	563	603	623	505	544	567	503	503	573	501	572
148	534	533	507	642	573	570	572	500	632	542	540	573	540	577	550	570	572	503	505	504	504	505	570	500	500
149	576	537	500	507	502	574	500	579	563	572	572	503	520	472	613	576	506	537	533	575	643	576	501	503	573
150	617	507	602	534	533	501	573	566	572	572	505	545	570	505	506	500	626	567	573	500	534	536	576	500	505
151	500	525	537	535	533	575	602	530	570	571	570	523	540	560	551	570	565	563	576	501	536	564	504	537	536
152	504	572	660	500	503	602	506	576	572	550	501	540	532	619	570	505	533	505	573	501	503	573	506	504	570
153	530	532	574	503	503	500	500	577	545	505	553	453	514	520	565	564	574	634	570	570	574	604	503	602	505
154	530	503	504	500	503	570	504	530	624	600	630	634	550	560	564	540	532	576	576	507	507	500	503	602	505
155	534	532	530	535	533	570	574	576	554	515	603	514	560	541	545	565	564	574	505	655	535	573	535	577	533
156	501	572	502	501	554	500	563	572	570	563	551	523	511	560	540	575	505	566	504	505	533	576	503	503	504
157	600	503	530	576	501	573	505	573	560	543	530	504	556	547	570	553	572	505	504	501	503	576	501	570	570
150	503	503	572	550	570	620	645	500	501	567	531	405	525	510	566	500	573	560	562	575	500	506	576	506	506
153	503	502	503	566	576	577	576	570	567	504	520	504	400	553	546	576	550	560	535	571	553	575	534	504	504
160	602	507	503	505	563	545	573	565	552	535	511	456	537	542	500	616	567	504	564	500	572	537	503	505	530
161	501	576	503	505	570	502	623	573	565	616	610	477	470	540	501	534	573	563	615	570	562	563	500	537	506
162	531	573	563	502	500	500	573	572	620	560	540	454	532	520	565	557	577	567	501	503	576	500	500	570	532
163	505	507	500	570	500	576	500	565	532	630	533	452	490	535	541	545	550	567	560	575	572	501	530	570	530
164	500	573	534	570	504	500	576	576	564	522	500	533	600	521	520	540	504	564	555	572	570	501	623	531	556
165	531	500	502	503	500	570	563	634	556	521	537	403	535	524	553	535	565	560	505	570	530	560	506	507	502
166	503	570	567	570	506	530	557	615	622	505	503	400	523	504	533	610	640	626	606	570	503	563	501	504	502
167	573	505	505	504	500	576	533	554	554	500	533	400	457	527	526	544	612	560	571	563	553	564	576	573	562
168	500	576	570	503	574	640	576	641	565	570	510	457	463	512	543	562	554	522	572	501	563	572	550	500	535
163	573	574	505	573	573	531	500	563	542	551	534	563	400	433	523	545	565	567	553	500	501	574	576	500	501
170	504	503	570	503	506	567	567	570	563	550	541	403	503	515	570	543	522	555	572	577	507	503	502	507	505
171	501	600	500	570	570	567	505	565	573	572	572	563	525	610	550	502	570	570	567	505	532	504	576	503	500
172	537	505	500	503	575	563	563	567	555	572	552	521	530	533	570	566	576	536	565	664	670	570	502	504	505
173	565	500	572	500	572	570	507	553	553	603	400	400	550	510	625	563	547	550	620	556	565	567	576	607	500
174	500	504	532	571	500	500	501	553	576	504	565	547	576	400	523	505	576	553	562	566	572	562	500	626	570
175	505	504	572	507	575	572	567	562	576	500	430	554	525	552	574	613	570	546	563	566	500	573	573	577	500
176	533	573	573	503	502	530	553	500	547	567	563	570	431	503	553	540	574	572	574	562	500	503	574	571	573
177	500	503	502	507	501	577	576	543	541	565	520	405	502	545	571	575	572	574	573	567	567	574	572	563	572
178	503	501	501	573	566	502	570	505	662	567	507	453	537	555	565	557	501	562	500	560	567	570	500	503	501
179	532	533	533	570	500	572	573	560	570	557	503	500	544	520	540	573	567	572	570	530	560	500	574	500	501
180	530	577	501	600	531	616	570	567	503	563	615	507	500	505	500	557	560	550	547	552	570	573	573	554	600
181	575	567	505	573	562	575	575	504	576	563	500	546	537	647	400	544	620	630	563	600	560	500	500	576	563
182	500	573	503	572	504	576	500	572	577	530	535	403	457	543	570	565	554	534	566	551	567	567	572	534	576
183	576	563	577	577	503	571	570	576	503	570	545	540	530	540	562	567	561	577	562	563	564	572	567	534	557
184	563	576	576	563	570	561	500	570	576	574	530	400	554	553	502	562	550	504	553	572	575	500	505	530	505
185	565	563	567	570	575	554	500	505	501	500	532	400	460	622	557	552	577	567	573	506	534	602	532	612	505
186	576	563	575	567	572	553	560	571	530	554	525	405	465	500	551	570	534	505	576	530	560	567	507	573	574
187	567	572	572	570	563	567	572	503	576	570	541	560	400	530	530	547	505	560	501	500	605	572	570	566	577
188	570	555	500	563	572	573	563	570	562	610	613	636	530	477	473	472	572	500	566	577	504	553	505	570	566

Figura 14 – Mapeamento manual por ultra-som do espécime T02 com L=980 mm

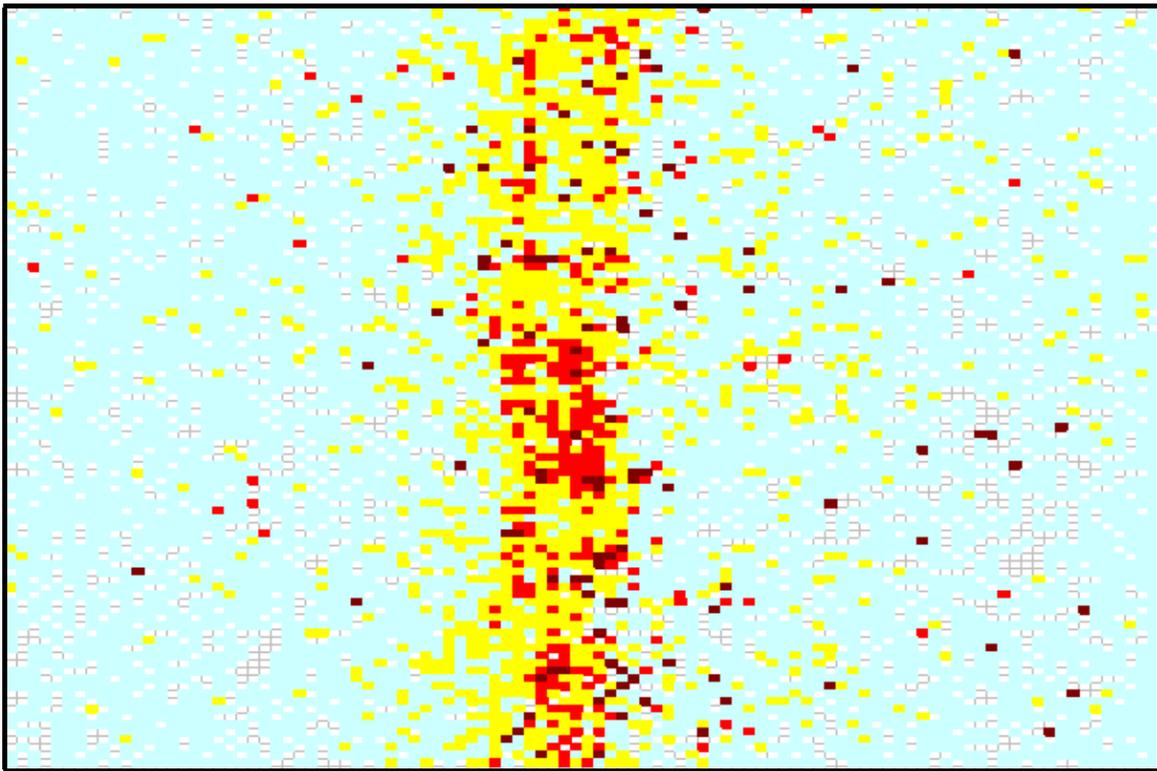


Figura 15 – Mapeamento mecanizado CSCAN ímpar por ultra-som do espécime T02 com L=990 mm

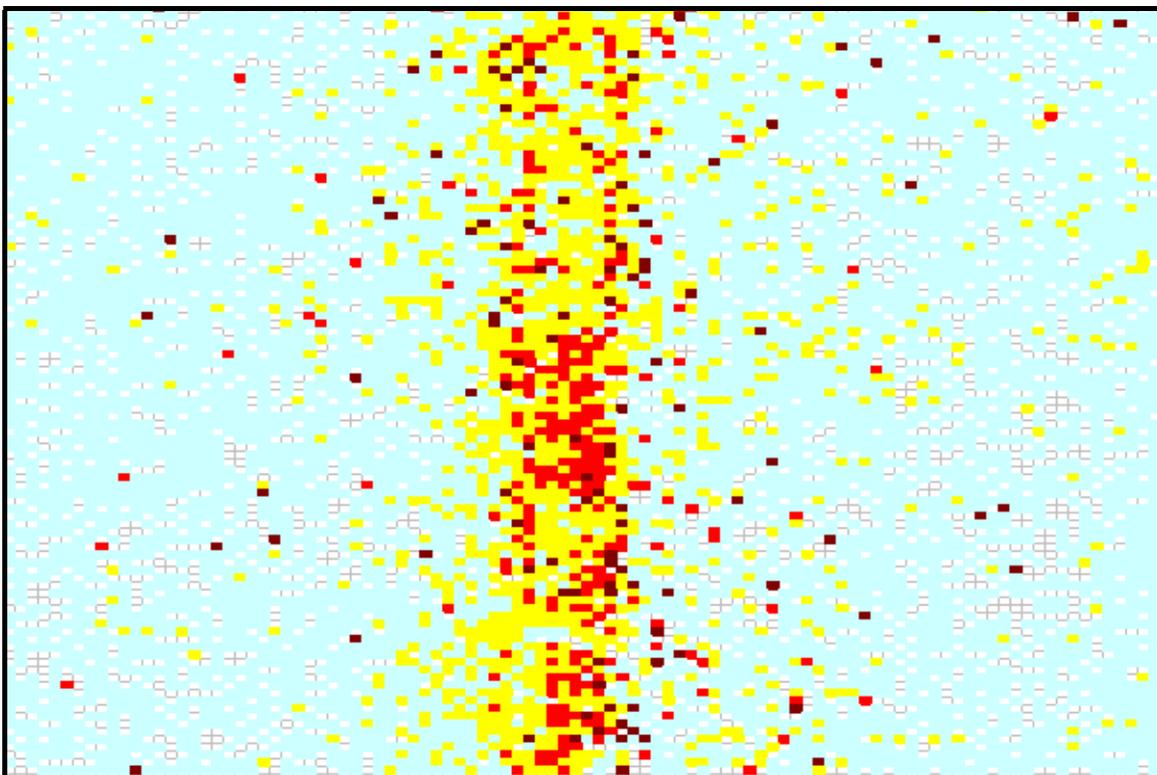


Figura 16 – Mapeamento mecanizado CSCAN par por ultra-som do espécime T02 com L=990 mm

## 4.5 Cálculo da pressão de ruptura

Para cada perfil de corrosão, relacionados nas tabelas 10 ,11 e Apêndice D, gerados a partir das medições manuais e mecanizadas, a pressão de ruptura foi calculada pelos métodos ASME B31G, 0,85 dL, DNV RP-F101 (defeitos isolados), “Effective Area”, “Effective Area” (para  $\sigma_{flow}$  igual à resistência à tração), DNV RP-F101 (defeitos de geometria complexa) e Área Total (para  $\sigma_{flow}$  igual a resistência à tração e M tendendo para infinito).

A pressão de ruptura de cada perfil foi calculada pelos métodos acima relacionados da seguinte forma:

- ASME B 31G – Pelo programa computacional RSTRENG e por planilha Excel.
- 0,85 dL - Pelo programa computacional RSTRENG e por planilha Excel.
- DNV RP-F101 (defeitos isolados) – Por planilha Excel e pelo programa computacional fornecido pela DNV à Petrobras, para o cálculo de defeitos isolados “Parte A”, fazendo os seguintes ajustes, recomendados pela própria DNV[37]:
  - Considerar no campo “Sizing Accuracy” do item “Safety Class, Material and Inspection Capabilities” o valor zero. Assim, o programa computacional desconsiderará a precisão da medição em função da técnica utilizada e entenderá que o valor medido é exato.
  - Ao utilizar o valor da tensão de ruptura obtida nos ensaios de tração, no campo Material Grade do item “Safety Class, Material and Inspection Capabilities”, entrar com o valor da resistência à tração( $\sigma_u$ ) dividido por 1,09 e multiplicar o valor calculado para a “Allowable pressure” na área “Results” por 1,09.

- Dividir o valor calculado para a “Allowable pressure” na área “Results” por “ $\gamma_m$ ” que se encontra na área “Specification of defect size”.

- “Effective Area” – Calculada pelo programa computacional RSTRENG
- “Effective Area” ( $\sigma_{flow}$  igual a resistência à tração) – Obtido pela multiplicação do resultado do método “Effective Area” pela razão resistência à tração por resistência ao escoamento mais 69 MPa.
- DNV RP-F101 ( complexo) – Pelo programa computacional fornecido pela DNV, promovendo os mesmos ajustes realizados no cálculo para defeitos isolados.
- Área Total - Por planilha Excel.

A tabela 12 apresenta os valores calculados de pressão de ruptura ( $P_{rup}$ ), em  $\text{kgf/cm}^2$ , para os métodos estudados, considerando os perfis “river bottom” levantados, as resistências ao escoamento e à tração reais do material e espessura de parede e diâmetro medidos. Faz parte também da tabela a pressão real de ruptura e a pressão estimada de ruptura para um tubo novo ( $P_{ruptn}$ ), calculada pela equação  $P_{ruptn} = 1,155 \frac{t\sigma_u}{D}$ , descrita no Apêndice E, sendo t e D valores nominais de espessura e diâmetro, respectivamente.

A tabela 13 apresenta os valores de  $P_{rup'}$  que é a razão da pressão de ruptura estimada pelos métodos pela pressão real de ruptura.

As figuras 17 a 25 representam graficamente os valores da pressão de ruptura  $P_{rup'}$  apresentados na tabela 13.

O Apêndice D apresenta os valores de  $P_{rup}$  e  $P_{rup'}$  para os perfis “river bottom” e geratriz de ruptura, considerando a espessura de parede e diâmetro nominais e resistências ao escoamento e à tração reais.

Tabela 12 - Pressão de ruptura estimada para cada método de cálculo, pressão de ruptura real e pressão de ruptura estimada para tubo novo, em kgf/cm<sup>2</sup>

Espécime / Tipo de Medição e de perfil	B31G	0,85 dL	DNV RP-F101 (isolado)	Eff. Area	Eff. Area ( $\sigma_{flow} = \sigma_u$ )	DNV RP-F101 (complexo)	Área Total ( $\sigma_{flow} = \sigma_u$ )	$P_{rup}$ real	$P_{ruptn}$ tubo novo
T 02 MM(100,20)	68,2	80,4	105,0	89,4	122,6	118,7	123,2	133,0	185,8
T 02 MM(50,20)	70,0	83,2	109,3	89,4	122,6	119,5	123,6		
T 02 MM(25,20)	70,0	85,4	112,6	89,4	122,6	119,8	120,5		
T 02 CSCAN(100,10, i)	54,9	69,4	86,8	80,5	110,3	108,5	108,6		
T 02 CSCAN(100,10, p)	58,9	73,1	92,9	81,4	111,6	109,1	109,7		
T 02 CSCAN(50,20, i)	59,2	74,4	102,0	80,7	110,6	116,4	109,8		
T 02 CSCAN(25,20, i)	60,1	76,7	98,0	82,0	112,4	110,7	112,4		
T 02 CSCAN (50,10, i)	58,9	75,7	96,5	82,7	113,4	111,6	113,4		
T 02 CSCAN (100,5)	58,9	75,7	96,6	82,5	113,1	111,3	113,1		
T 04 MM(100,20)	69,2	82,1	98,3	91,8	116,5	115,6	116,1	123,0	176,3
T 04 MM(50,20)	69,2	83,3	100,0	92,5	117,4	116,4	115,8		
T 04 CSCAN(100,10, i)	51,6	67,4	75,8	85,2	108,1	104,2	108,0		
T 04 CSCAN(100,10, p)	51,6	67,4	75,8	84,7	107,6	104,4	106,6		
T 05 MM(100,20)	53,7	66,2	75,5	78,2	94,6	94,5	96,4	103,3	140,1
T 05 MM(50,20)	55,8	69,1	79,7	80,7	97,6	96,2	97,0		
T 05 CSCAN(100,10, i)	46,5	60,5	67,2	73,3	88,7	86,8	87,8		
T 05 CSCAN(100,10, p)	45,3	59,4	65,5	73,7	89,2	87,4	88,3		
T 06 MM(100,20)	54,9	70,0	66,5	96,1	103,1	100,2	106,6	105,4	149,8
T 06 MM(50,20)	70,5	85,8	86,4	96,1	103,1	100,7	106,5		
T 06 CSCAN(100,10, i)	57,0	73,6	70,7	74,3	79,8	77,8	77,8		
T 06 CSCAN(100,10, p)	57,0	73,6	70,7	75,3	80,9	79,2	78,9		
T 10 MM(100,20)	66,8	79,6	96,5	93,6	121,0	118,6	123,9	128,8	182,2
T 10 MM(50,20)	73,1	86,4	106,7	93,6	121,0	118,6	121,7		
T 10 CSCAN(100,10, i)	58,5	73,3	86,6	89,6	115,8	114,4	114,0		
T 10 CSCAN(100,10, p)	57,6	72,5	85,4	88,8	114,8	112,5	113,2		

Tabela 13 - Valores de  $P_{rup}$  para cada método de cálculo

Espécime / Tipo de Medição e de perfil	B31G	0,85 dL	DNV RP-F101 (isolado)	Eff. Area	Eff. Area ( $\sigma_{flow} = \sigma_u$ )	DNV RP-F101 (complexo)	Área Total ( $\sigma_{flow} = \sigma_u$ )
T 02 MM(100,20)	0,51	0,60	0,79	0,67	0,92	0,89	0,93
T 02 MM(50,20)	0,53	0,63	0,82	0,67	0,92	0,90	0,93
T 02 MM(25,20)	0,53	0,64	0,85	0,67	0,92	0,90	0,91
T 02 CSCAN (100,10, i)	0,41	0,52	0,65	0,60	0,83	0,82	0,82
T 02 CSCAN (100,10, p)	0,44	0,55	0,70	0,61	0,84	0,82	0,82
T 02 CSCAN(50,20, i)	0,45	0,56	0,77	0,61	0,83	0,88	0,83
T 02 CSCAN(25,20, i)	0,45	0,58	0,74	0,62	0,85	0,83	0,85
T 02 CSCAN (50,10, i)	0,44	0,57	0,73	0,62	0,85	0,84	0,85
T 02 CSCAN (100,5)	0,44	0,57	0,73	0,62	0,85	0,84	0,85
T 04 MM(100,20)	0,56	0,67	0,80	0,75	0,95	0,94	0,94
T 04 MM(50,20)	0,56	0,68	0,81	0,75	0,95	0,95	0,94
T 04 CSCAN (100,10, i)	0,42	0,55	0,62	0,69	0,88	0,85	0,88
T 04 CSCAN (100,10, p)	0,42	0,55	0,62	0,69	0,87	0,85	0,87
T 05 MM(100,20)	0,52	0,64	0,73	0,76	0,92	0,91	0,93
T 05 MM(50,20)	0,54	0,67	0,77	0,78	0,95	0,93	0,94
T 05 CSCAN (100,10, i)	0,45	0,59	0,65	0,71	0,86	0,84	0,85
T 05 CSCAN (100,10, p)	0,44	0,57	0,63	0,71	0,86	0,85	0,85
T 06 MM(100,20)	0,52	0,66	0,63	0,91	0,98	0,95	1,01
T 06 MM(50,20)	0,67	0,81	0,82	0,91	0,98	0,95	1,01
T 06 CSCAN (100,10, i)	0,54	0,70	0,67	0,70	0,76	0,74	0,74
T 06 CSCAN (100,10, p)	0,54	0,70	0,67	0,71	0,77	0,75	0,75
T 10 MM(100,20)	0,52	0,62	0,75	0,73	0,94	0,92	0,96
T 10 MM(50,20)	0,57	0,67	0,83	0,73	0,94	0,92	0,94
T 10 CSCAN (100,10, i)	0,45	0,57	0,67	0,70	0,90	0,89	0,89
T 10 CSCAN (100,10, p)	0,45	0,56	0,66	0,69	0,89	0,87	0,88

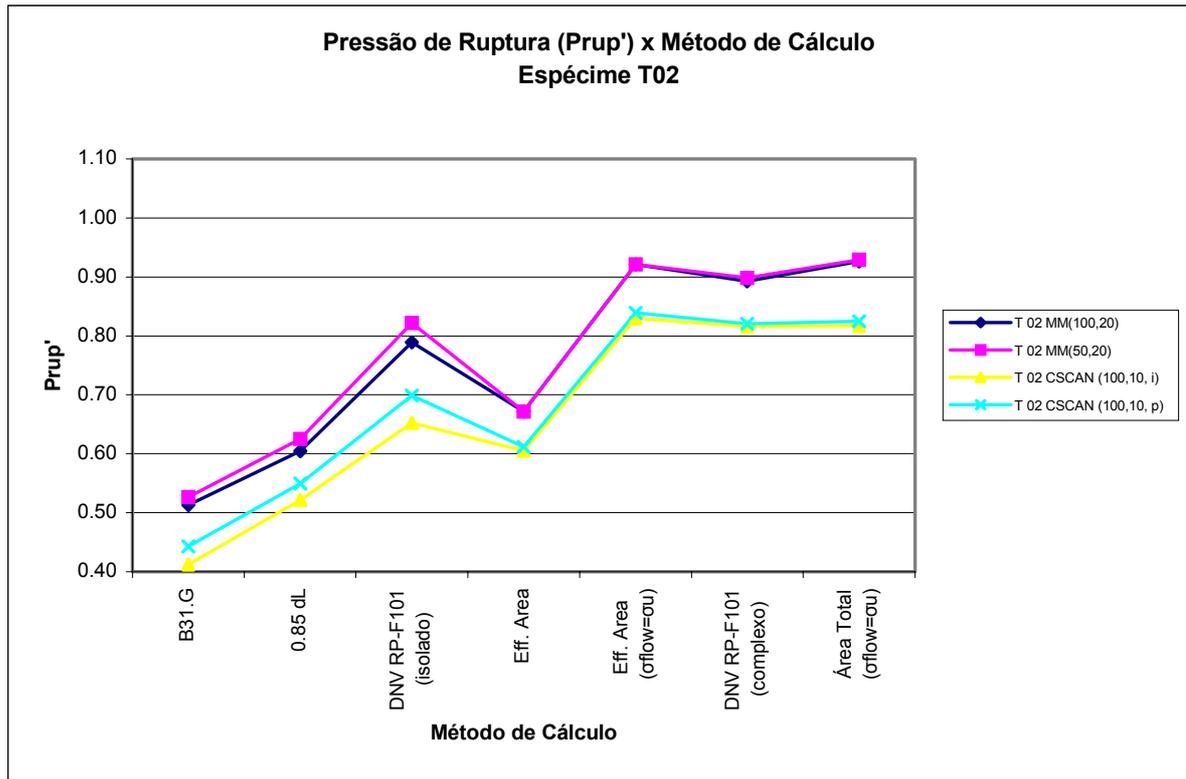


Figura 17 - Gráfico de  $P_{rup}$  x método de cálculo do Espécime T 02

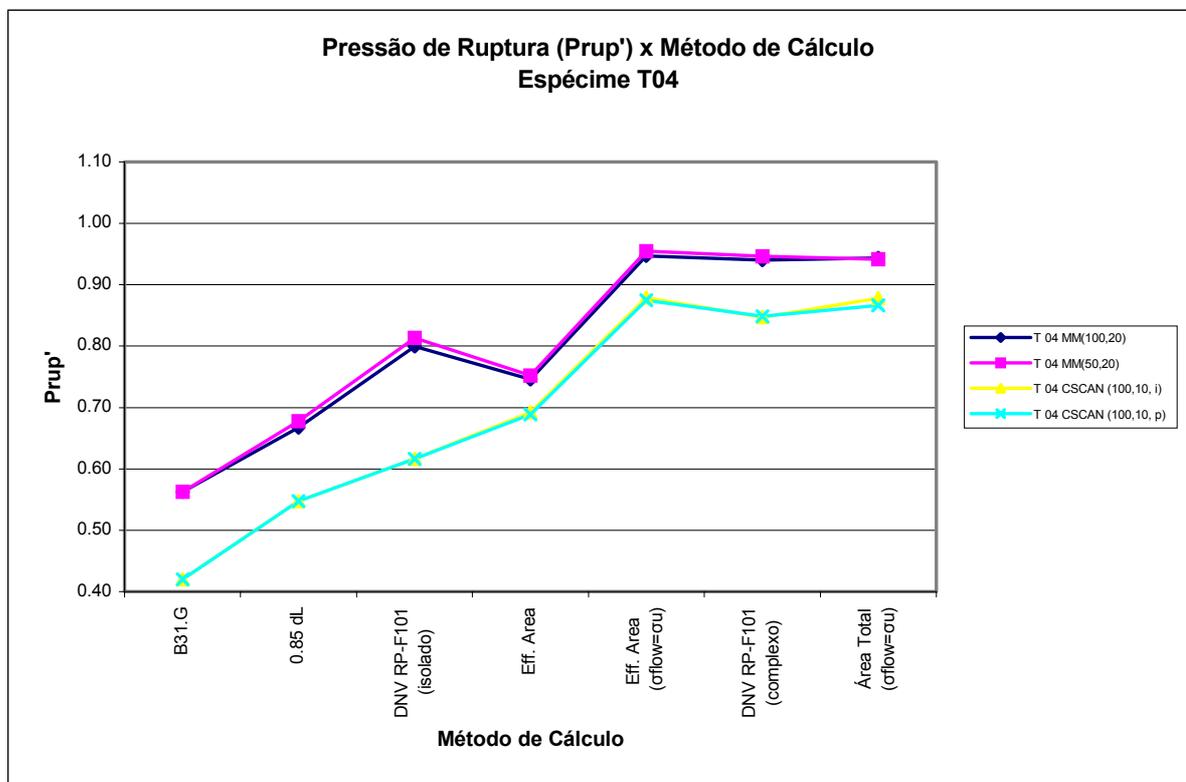


Figura 18 - Gráfico de  $P_{rup}$  x método de cálculo do Espécime T 04

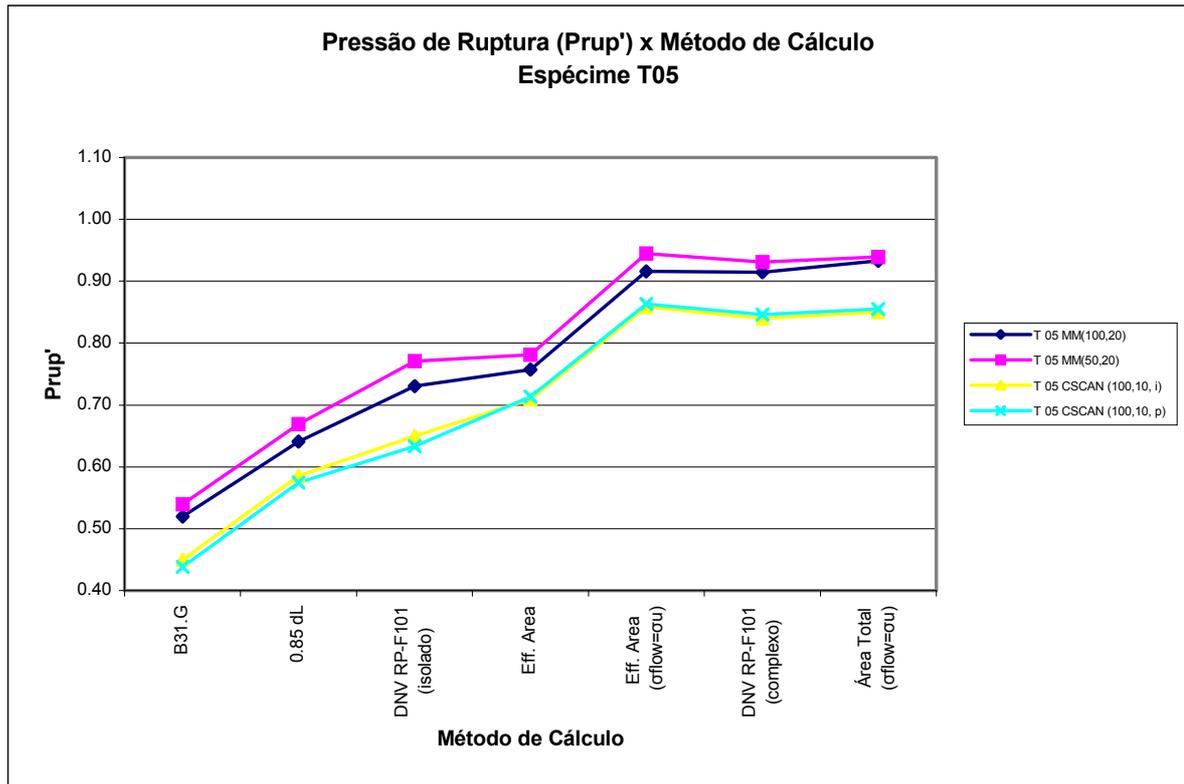


Figura 19 - Gráfico de  $P_{rup}$  x método de cálculo do Espécime T 05

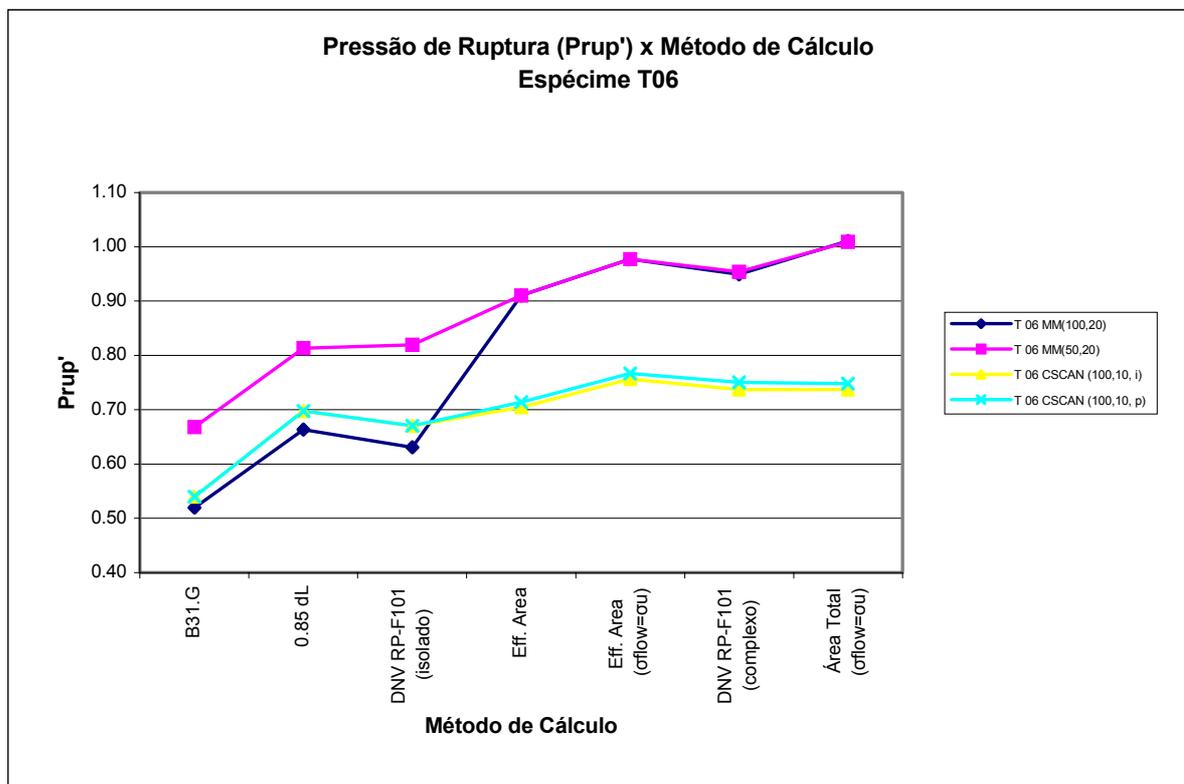


Figura 20 - Gráfico de  $P_{rup}$  x método de cálculo do Espécime T 06

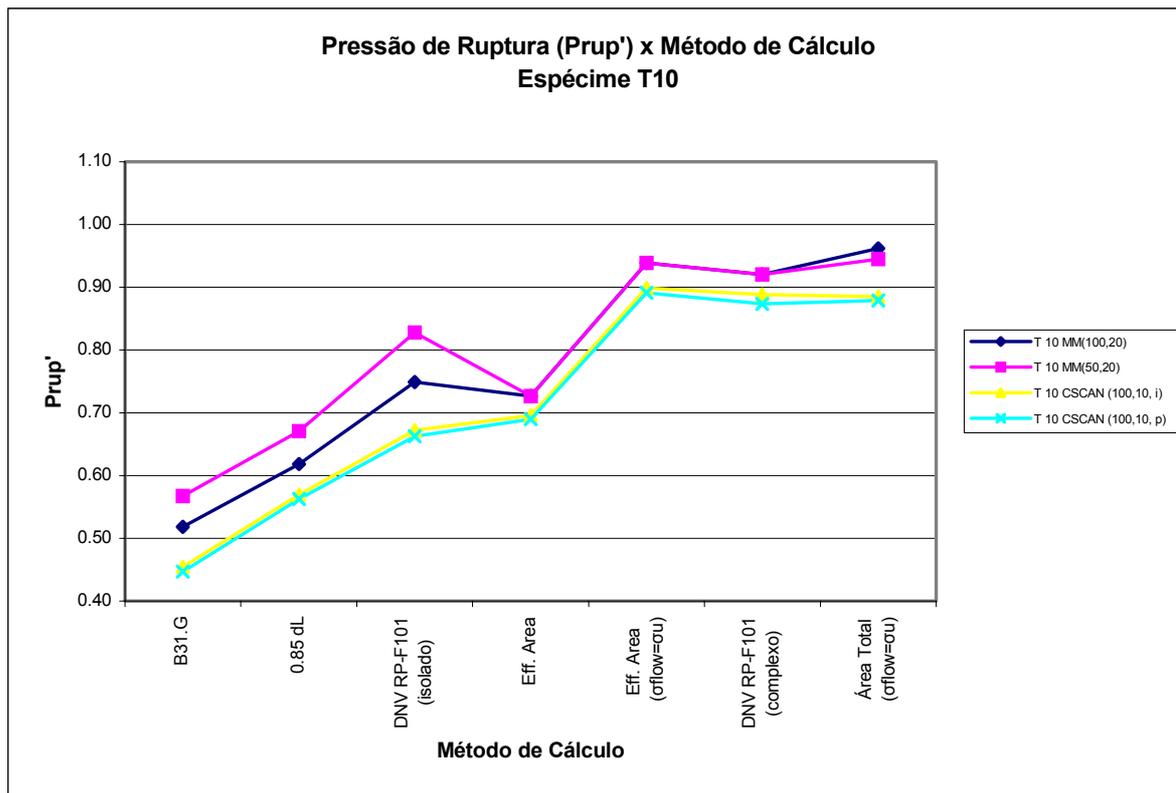


Figura 21 - Gráfico de  $P_{rup}$  x método de cálculo do Espécime T 10

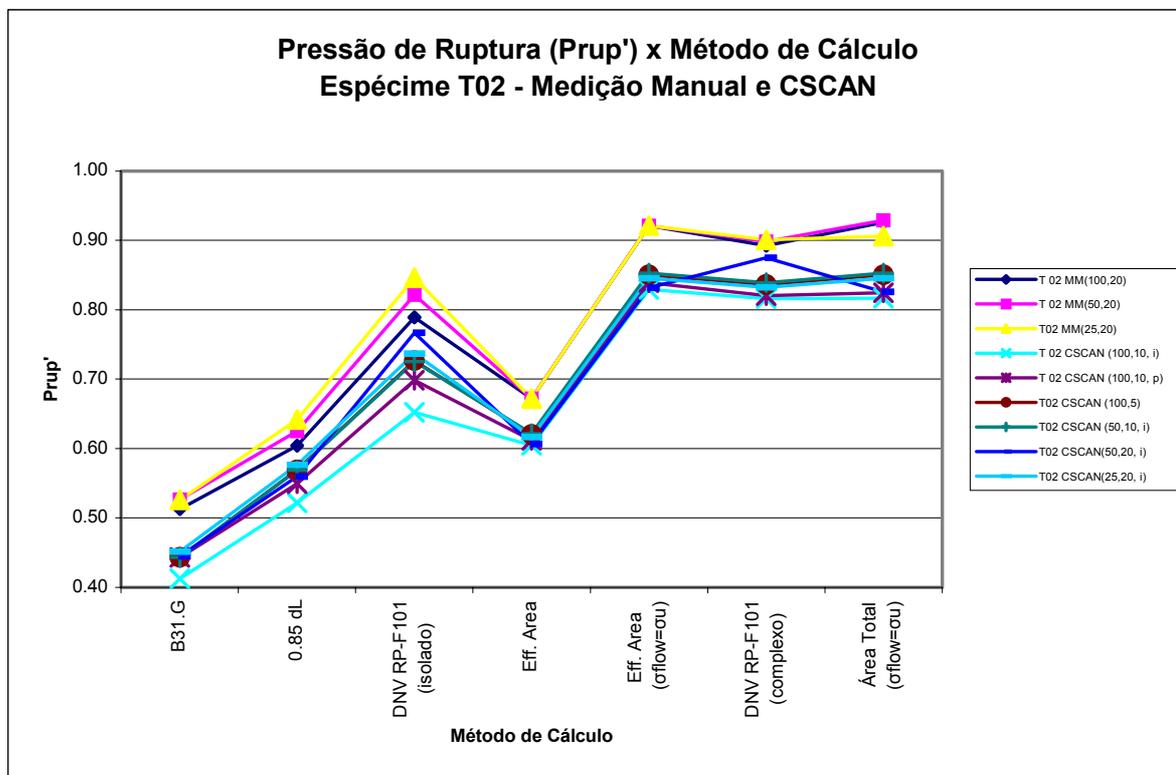


Figura 22 - Gráfico de  $P_{rup}$  x método de cálculo do Espécime T 02 – Todos perfis

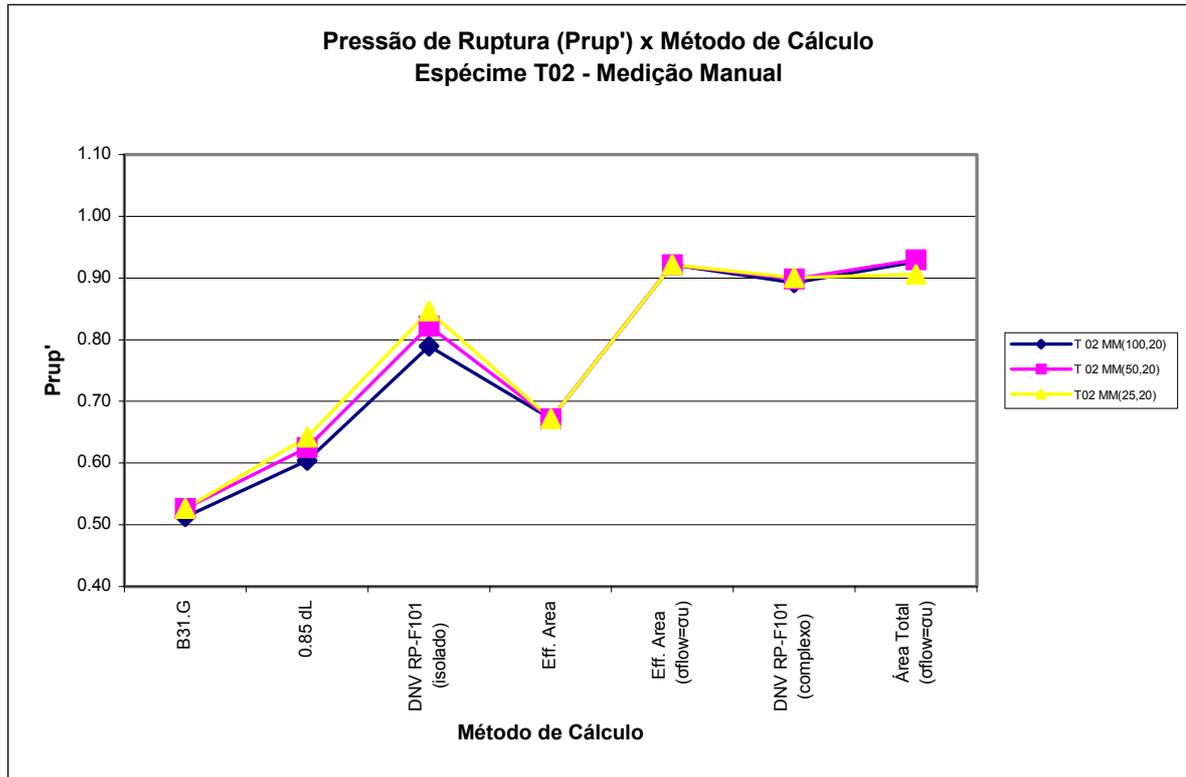


Figura 23 - Gráfico de  $P_{rup}$  x método de cálculo do Espécime T 02 – Medição manual

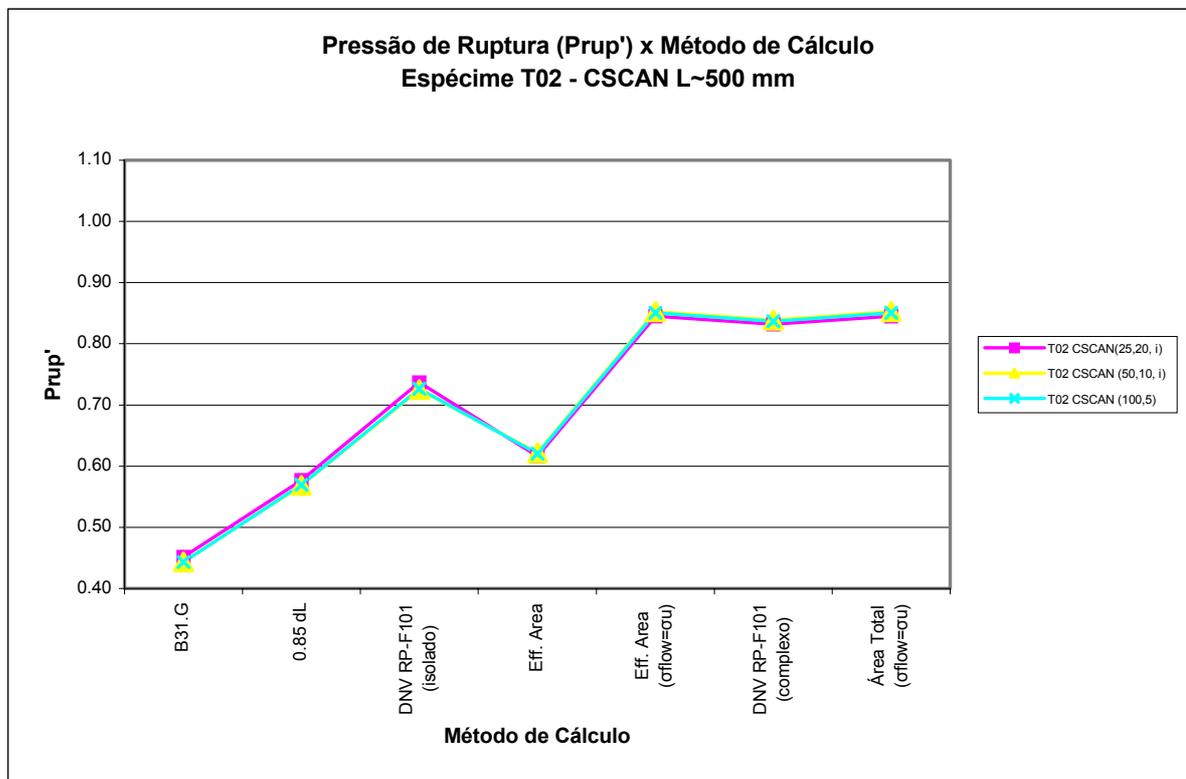


Figura 24 - Gráfico de  $P_{rup}$  x método de cálculo - Espécime T 02 - CSCAN - L ~ 500 mm

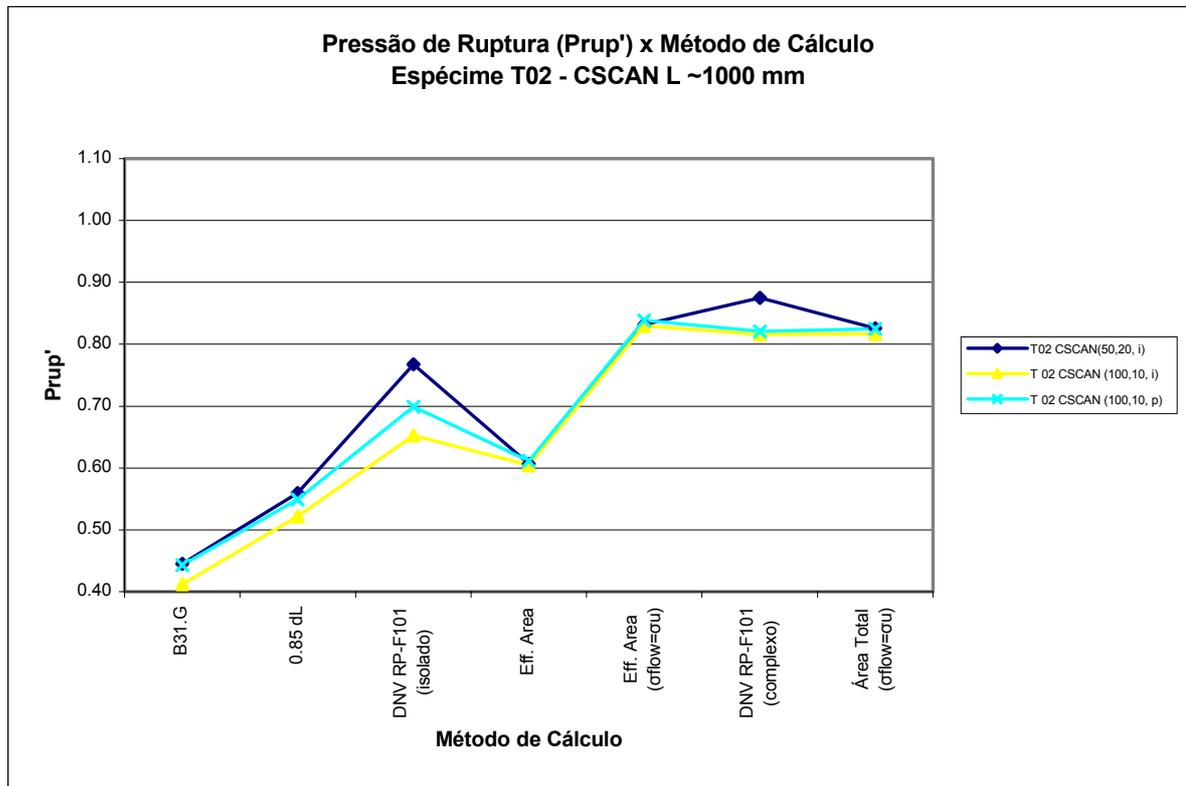


Figura 25 - Gráfico de  $P_{rup}$  x método de cálculo-Espécime T 02–CSCAN - L ~ 1000 mm